

30-0200 101

Beschränkung der Rißbreite bei Bauteilen aus Schleuderbeton

Versuche zum Einfluß der Schleuderparameter
auf das Materialverhalten

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina

Dr.-Ing. H.-H. Osteroth

Braunschweig im September 1990

Das Forschungsvorhaben wurde vom Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst aus Mitteln des Zahlenlottos gefördert.

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|-------|
| 1. Einleitung | 3 |
| 2. Übersicht zum bestehenden Kenntnisstand | 9 |
| 2.1 Grundgleichungen zum Schleudervorgang | 9 |
| 2.2 Literaturangaben zu Einflüssen auf das Schleudern | 11 |
| 2.3 Schäden an Schleuderbetonbauteilen | 15 |
| 3. Eigene Versuche zum Schleudern von Beton | 20 |
| 3.1 Zielsetzung der Versuche | 20 |
| 3.2 Versuchsdurchführung | 20 |
| 4. Untersuchungsprogramm | 24 |
| 4.1 Variation der Parameter | 24 |
| 4.2 Versuchsaufzeichnungen und begleitende Messungen | 25 |
| 4.3 Festigkeitsuntersuchungen | 26 |
| 5. Ergebnisse der eigenen Schleuderversuche | 28 |
| 5.1 Darstellung der Versuchsergebnisse | 28 |
| 5.2 Charakteristische Merkmale der Versuchsserien | 28 |
| 5.3 Darstellung der untersuchten Parametereinflüsse und Vergleich der Versuchsserien | 32 |
| 6. Zusammenfassung und Anmerkungen zur Rißbreitenbeschränkung | 36 |
| 7. Literaturverzeichnis | 41 |

1. Einleitung

Die Möglichkeit, Beton mit Hilfe der Zentrifugalkraft, die beim raschen Drehen in einer geschlossenen Form entsteht, intensiv zu verdichten, ist seit langem bekannt. Unter Ausnutzung dieser Kraftwirkung hergestellter Beton wird als Schleuderbeton bezeichnet. Bereits im Jahre 1907 meldete die Baufirma Otto & Schlosser das erste Patent für Schleuderbeton an und errichtete die erste Schleuderbeton - Mastfabrik. Weil im Schleuderverfahren damals zuverlässiger Beton höherer Festigkeit hergestellt werden konnte als mit anderen Verdichtungsverfahren, erfuhr der Schleuderbeton sehr rasch eine weite Verbreitung. Neben der erwähnten "Schlosser Maschine", bei der eine vergleichsweise leichte Schalung mit der Bewehrung in Längsrichtung in angetriebene Lauftrommeln mit fest vorgegebenem Durchmesser eingeschoben und befestigt werden, wurde daneben in der Schweiz von Vianini /23,31/ eine Schleudermaschine entwickelt, bei der die Form ähnlich wie bei einer Drehbank an den Enden eingespannt und gehalten wird. Heute ist die gemäß Bild 1.1 ausgeführte Rollenbank der verbreitetste Schleudermaschinen Typ, weil bei diesen Anlagen die geringsten Einschränkungen hinsichtlich des Durchmessers und der Länge der Schalform bestehen.

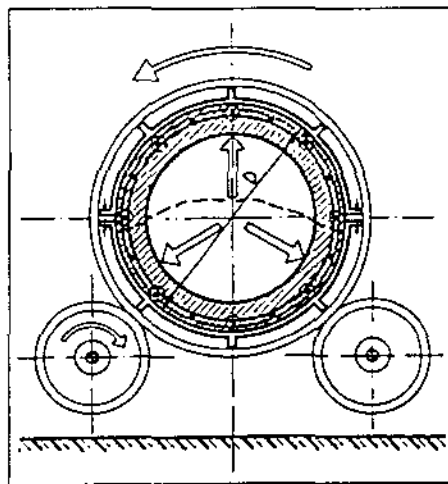


Bild 1.1: Prinzipskizze einer Rollenbank mit Schleuderform

Eine ausführliche Übersicht zur Entwicklung des Schleuderverfahrens bis heute gibt Basca in /1/. Weitere Hinweise dazu enthalten /8,22,25,27/. Trotz der mittlerweile gegebenen Möglichkeit, auch in stehenden bzw. ortsfesten Schalungen eine gute Verdichtung und damit hohe Betongüten zu errei-

chen, wurden Schleuderbetonbauteile bei vielen Bauaufgaben wegen ihres geringen Wartungsbedarfs und des Fortfalls ergänzender Korrosionsschutzmaßnahmen gerne angewendet; sie zeigten sich in den vergangenen Jahren vor allem beim Ausbau der Stromversorgungsnetze /3,11,13,14,15/ und der Oberleitungsmasten für die Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn als wirtschaftlich überlegen.

Auch wenn traditionsgemäß Maste aus Schleuderbeton nach wie vor den größten Anteil der Schleuderbetonproduktion ausmachen, so sind dennoch in den vergangenen Jahren zunehmend erweiterte Anwendungsmöglichkeiten für Schleuderbeton erschlossen worden. Um die Konzeption der vorliegenden Forschungsarbeit an den baupraktisch bedeutsamen Rahmenbedingungen zu orientieren, werden nachfolgend zunächst einige Anmerkungen zu möglichen Anwendungsfällen und zu ihrer heutigen Bedeutung für die Verbreitung des Schleuderbetons zusammengestellt, unter anderem, um daran das Untersuchungsprogramm zu orientieren:

- Rohre für den Flüssigkeitstransport

Zeitlich schon vor den ersten Schleuderbetonrohren wurden zahlreiche Verfahren zur Rohrherstellung entwickelt, die vor allem den Vorteil einer zuverlässigeren Zielsicherheit bei der Herstellung glatter, dichter Oberflächen an der Rohrrinnenseite bieten und darüberhinaus eine genauere Fertigung der Rohrübergänge ermöglichen. Die Bedeutung des Schleuderbetons für die Rohrfertigung ist daher im Laufe der Zeit nicht angestiegen /45/.

- Rammpfähle im Hoch-, Brücken- und Hafenbau

Produziert werden in erheblichem Umfang konische Stahlbetonpfähle in Längen bis zu 12 m mit Durchmessern bis zu 45 cm. Für den Einsatz im Hafen- und Brückenbau werden jedoch auch deutlich größere Längen und Durchmesser produziert.

- Maste für Freileitungen, Antennen und Beleuchtung

In der Bundesrepublik und dem europäischen Ausland hat dieses Anwendungsgebiet den weitaus größten Anteil an der Schleuderbetonproduktion. Dabei werden heute mit vorgespannten Masten insbesondere im Antennenbau sehr große Höhen erreicht, die zum Teil deutlich über 100 m hinausreichen /16/.

- Pfeiler und Stützen im Hoch- und Brückenbau

Wegen ihrer hohen Betondruckfestigkeit werden vorgefertigte Schleuderbetonbauteile vielfach für Druckglieder mit großer Schlankheit angewendet. Beispiele für den Einsatz als Fertigteile finden sich vor allem in den USA und der Schweiz, z.B. beim Bau von Geschäftshäusern und Parkbauten. Aus der Bundesrepublik Deutschland ist als architektonisch interessantes Beispiel für die Anwendung von besonders schlanken Schleuderbetonstützen der Neubau des Vordaches für den Bahnhof Wilhelmshöhe in Kassel zu nennen. Eine Übersicht zu den im Fertigteilbau besonders bedeutungsvollen Verbindungsdetails zeigt Bild 1.2.

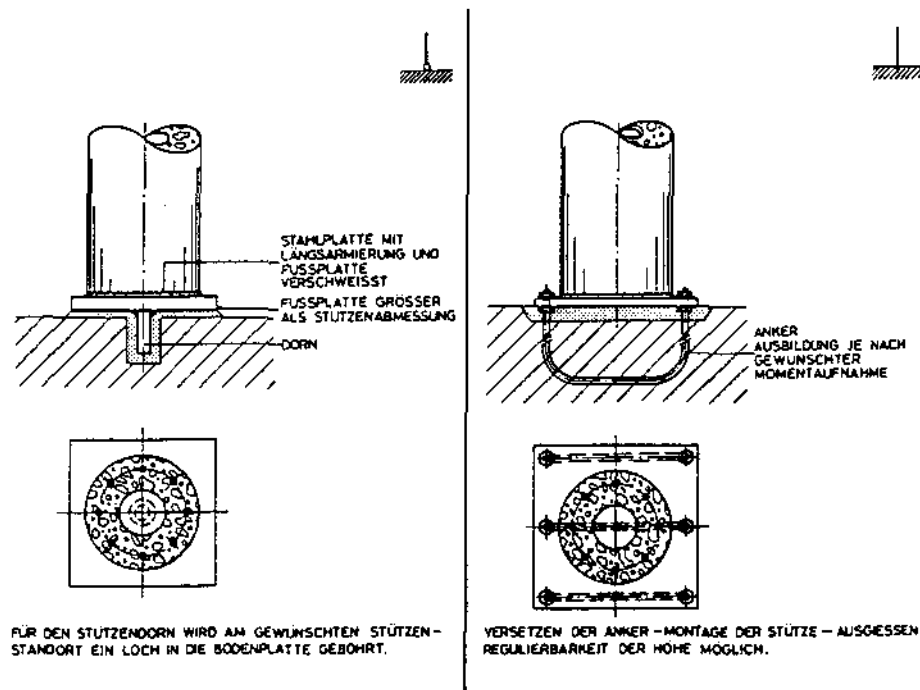


Bild 1.2: Beispiele zur Fußpunktausbildung bei vorgefertigten Schleuderbetonstützen nach /45/

- Verbundquerschnitte mit ausgeschleuderten Stahlprofilen

Solche ausgeschleuderten Verbundquerschnitte wurden in letzter Zeit vor allem im Ausland entwickelt. Ihr Einsatz ist bei Konstruktionen sinnvoll, die sehr hohe Festigkeiten erfordern und bei denen die Montierbarkeit der Stahlprofile sowie die hohe Feuerwiderstandsfähigkeit des Verbundquerschnitts von Vorteil sind. Bild 1.3 zeigt beispielhaft einige Querschnitte,

bei denen handelsübliche Profile verwendet wurden. In letzter Zeit werden gelegentlich auch solche Stahlprofile eingesetzt, bei denen die Formgebung mit Rücksicht auf die Fliehkraft erfolgt. Dadurch soll die Bildung von Zonen mit verminderter Zentrifugalkraftwirkung, die im Schleuderschatten eine geringere Verdichtung aufweisen, vermieden werden, sowie eine bessere Verzahnung mit dem Stahlprofil erreicht werden.

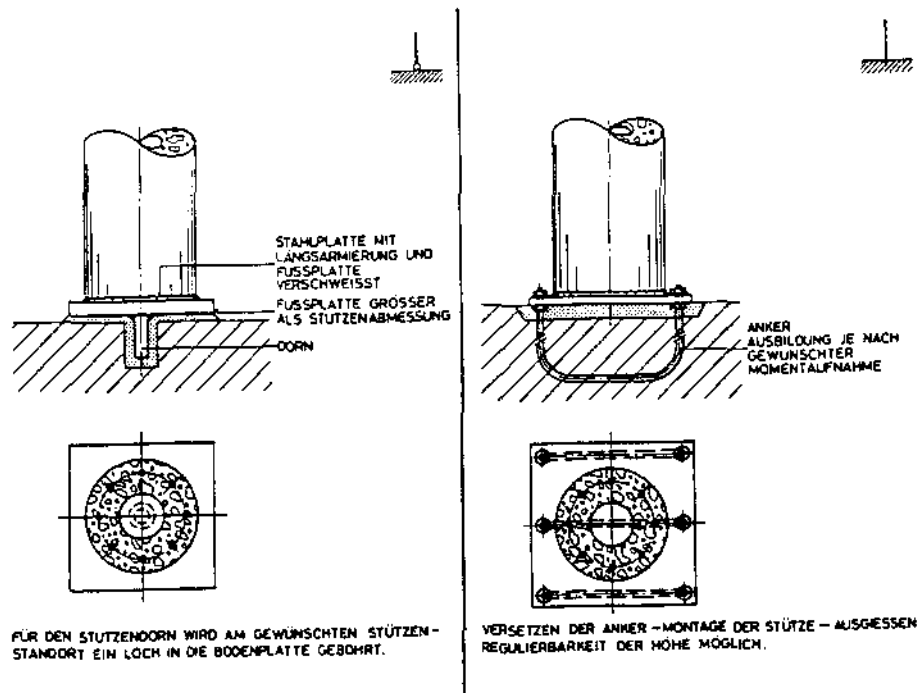


Bild 1.3: Beispielhafte Details für den Stoß vorgefertigter Schleuderbetonstützen nach /45/

Diese Übersicht der Einsatzmöglichkeiten des Schleuderbetons verdeutlicht, daß die Anwendung auch heute noch sehr oft wegen der hohen Betonfestigkeit erfolgt. Insbesondere die Aufgaben im Hoch- und Brückenbau, der Bau sehr hoher Maste sowie die Entwicklung von Querschnitten mit ausgeschleuderten Stahlprofilen erfordern daher zukünftig sicherlich in weit höherem Maße als schon bisher Anpassungen und Variationen der Betonmischungen sowie differenziertere Abläufe des Schleudervorgangs.

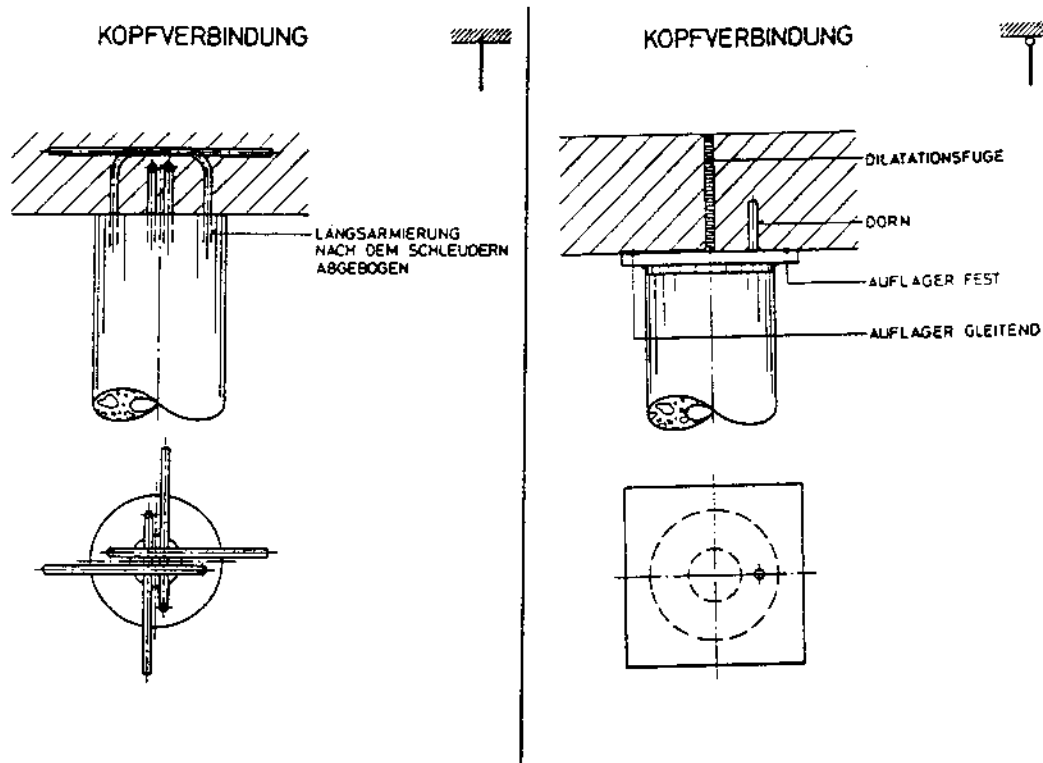


Bild 1.4: Beispiele zur Kopfpunktausbildung bei vorgefertigten Schleuderbetonstützen nach /45/

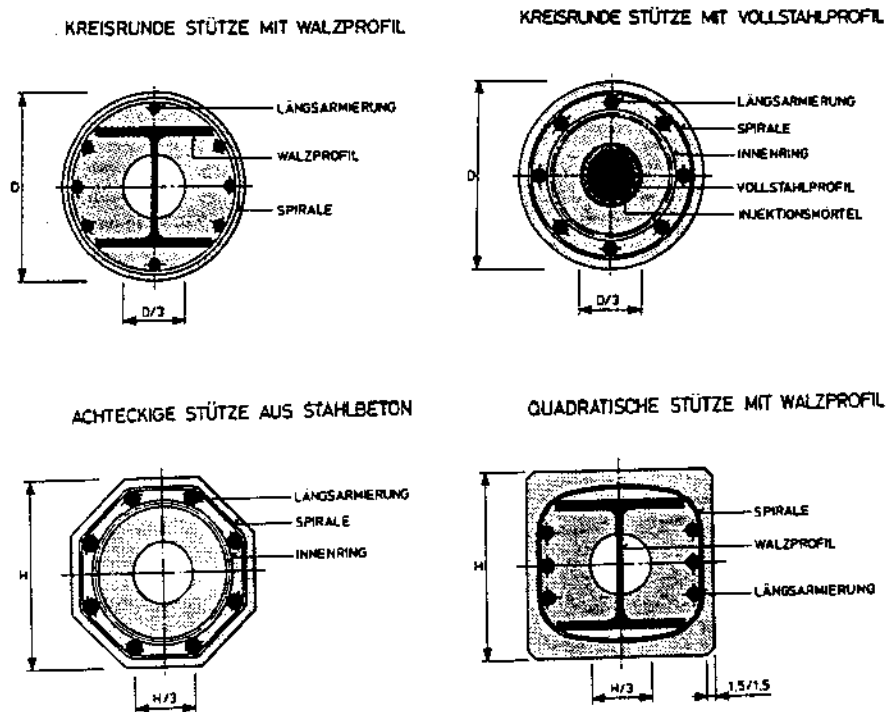


Bild 1.5: Querschnitte mit ausgeschleuderten Stahlprofilen /36,45/

Bild 1.6 zeigt dazu beispielhaft einen Stützenquerschnitt, wie er im europäischen Ausland wiederholt verwendet wird. Um aus der intensiven Verdichtungsarbeit und der damit gegebenen hohen Betonfestigkeit eine entsprechende Tragfähigkeit des Gesamtquerschnittes zu erzielen, weist die Stütze einen Bewehrungsgehalt auf, der deutlich über dem nach DIN 1045 zulässigen Wert liegt. Dabei ist im Hinblick auf die als Voraussetzung zur Herstellung solcher Querschnitte anzusehende Verdichtung unter anderem sicherzustellen, daß die Betonmischung den Bewehrungsabständen angepaßt wird, um Inhomogenitäten des Gefüges beim Schleudern zu vermeiden.

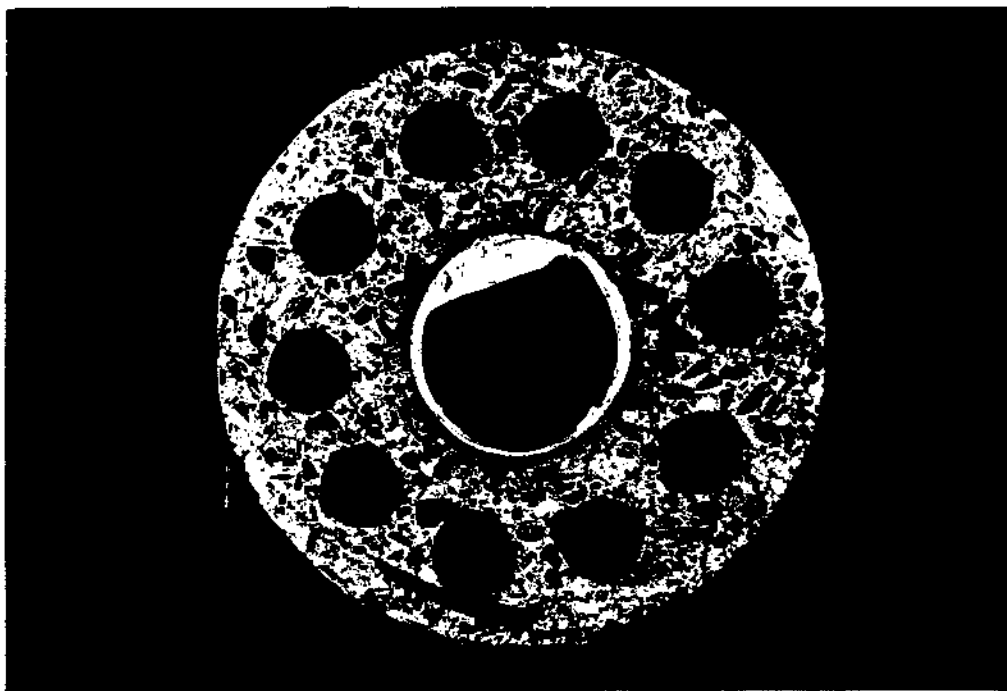


Bild 1.6: Querschnitt einer Schleuderbetonstütze mit hohem Bewehrungsgrad, Durchmesser der Betonstähle $d_s = 40$ mm

Zu der bei neuen Aufgabenstellungen geforderten gezielten Einstellung bestimmter Schleuderbetoneigenschaften ist anzumerken, daß gesicherte Erkenntnisse über den Einfluß der Mischungszusammensetzung und des Schleudervorganges bis heute in der Regel nur in der langjährigen Erfahrung weniger technischer Mitarbeiter in den Schleuderbetonwerken bestehen und nicht ver-

öffentlich wurden. Ein wesentliches Ziel dieser Forschungsarbeit besteht deshalb in der systematischen Untersuchung der wichtigsten Schleuderparameter. Damit soll erreicht werden, daß die Auswirkungen von Änderungen der Betonrezepturen oder des Schleudervorganges bei erweiterten Nutzungen der Schleudertechnik, wie sie am Beispiel des hochbewehrten Stützenquerschnitts in Bild 1.6 aufgezeigt wurden, zukünftig zutreffend abgeschätzt werden können.

2. Übersicht zum bestehenden Kenntnisstand

2.1 Grundgleichungen zum Schleudervorgang

Nach der Verteilung des Frischbetons in der Form, die entweder durch gleichmäßiges Einbringen des Betons oder bereits durch Drehen der Form beim Einfüllen mit der sogenannten Verteilungsdrehzahl erfolgt, wird der Beton im anschließenden eigentlichen Schleudervorgang verdichtet (Verdichtungszeit). Die dabei entstehenden Kraftwirkungen können mit einigen einfachen physikalischen Grundgleichungen ausreichend genau erfaßt werden. Sie wurden unter anderem von Marquardt /22/ und Meyer-Ottens /24/ zusammengestellt und werden nachfolgend angegeben. Danach wirkt auf jedes Masseteilchen m der Betonmischung (Zement, Zuschlagstoff und Wasser) eine Fliehkraft F gemäß Gl. (2.1).

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (2.1)$$

Darin sind v die Bahngeschwindigkeit und s der Bahnradius. Weiterhin gilt:

| | |
|----------------------|-----------------------------|
| $v = u \cdot r$ | v = Bahngeschwindigkeit |
| | u = Winkelgeschwindigkeit |
| | r = Bahnradius |
| $m = G/g$ | G = Gewicht |
| | g = Erdbeschleunigung |
| $G = \gamma \cdot V$ | γ = spez. Gewicht |
| | V = Volumen |

Mit diesen Grundgleichungen kann Gl. (2.1) umgeformt werden:

$$F = \frac{u^2}{g} \cdot \gamma \cdot V \cdot r \quad (2.2)$$

Gl. (2.2) verdeutlicht die lineare Proportionalität der Fliehkraft zum spezifischen Gewicht, zum Volumen und zum Bahnradius. Für den Schleudergang folgt daraus, daß Zuschlagkörner mit höherem spezifischen Gewicht bei Volumengleichheit stärker an die Außenwand der Form gedrückt werden als spezifisch leichtere Zuschlagkörner. Von zwei Zementkörnern mit gleichem spezifischen Gewicht, wird jenes mit dem größeren Volumen nach außen gedrückt. Damit verdeutlicht Gl. (2.2) auch, daß der Schleudervorgang immer zu einer Materialabstufung der Betonmischung führt. Während die gröberen Zuschläge nach außen streben, lagern sich die feineren Bestandteile an der Innenwand ab. Diese Zusammenhänge sind für die Beurteilung der Entmischungsneigung einer Betonrezeptur von Interesse.

Als Maß für die Drehgeschwindigkeit wird in der Baupraxis üblicherweise die Drehzahl verwendet. Zur Bahngeschwindigkeit besteht folgender Zusammenhang:

$$v = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot r \cdot n \quad (2.3)$$

mit n [Umdreh./min.], r [m], v [m/sec.].

Damit können die Pressungen am Fußpunkt und im Scheitel eines Schleuderbetonquerschnittes berechnet werden, wenn statt des Betongewichts G die Flächenlast q des Betons eingesetzt wird.

$$p_{a \text{ Scheitel}} \approx \frac{q_B \cdot r_a \cdot n^2}{90} - q_B \quad (2.4a)$$

$$p_{a \text{ Fußpunkt}} \approx \frac{q_B \cdot r_a \cdot n^2}{90} + q_B \quad (2.4b)$$

mit p_a : äußerer Preßdruck $[\text{kN/m}^2]$
 q_B : Eigengewicht des Betons über die Fläche $[\text{kN/m}^2]$
 r_a : äußerer Bahnradius $[\text{cm}]$
 n : Drehzahl $[\text{Umdreh./min.}]$

Setzt man in Gl. (2.4b) den Innenradius r_i ein, so kann die Minstdrehzahl n_{\min} bestimmt werden, die erforderlich ist, damit kein Material aus dem Scheitel nach unten fällt:

$$n_{\min} \approx \frac{9,5}{\sqrt{r_i}} \quad (2.5)$$

2.2 Literaturangaben zu Einflüssen auf das Schleudern

2.2.1 Angaben zur Betontechnologie

Erste Hinweise auf eine für Schleuderbeton günstige Mischungszusammensetzung enthält bereits der Aufsatz von Ros /33/ über Rohre der Bauart Vianini aus dem Jahre 1929. Darin wird empfohlen, zum Schleudern Betonmischungen mit stark plastischer Konsistenz zu verwenden, die etwa 450 bis 550 kg/m^3 hochwertigen Portlandzement enthalten. Zur Verteilung des Zements über die Wanddicke wird angegeben, daß nach dem Schleudern an der Außenseite ein Zementgehalt von etwa 466 kg/m^3 vorhanden ist. Bis etwa 9/10 der Wanddicke von außen steigt der Zementgehalt auf 490 kg/m^3 an, so daß über die äußeren 9/10 der Wanddicke im Mittel 475 kg/m^3 Zement im Beton enthalten sind. Für die innere Schicht wird über eine Dicke von 2 - 5 mm ein Zementgehalt von 1400 kg/m^3 angegeben. In /26/ werden für das zu wählende Verhältnis des Zementes zum Zuschlag etwa 1:3 bis 1:5 genannt.

Über erste systematische Versuche mit Schleuderbeton berichtet Zollinger in /43/. Es wurden Rohre geschleudert, die bei einem Durchmesser von 20 cm mit $d = 2$ cm allerdings nur eine sehr geringe Wanddicke besaßen. Ein mit 50 cm als zweckmäßig erachtetes Ausbreitmaß wurde bei allen Versuchen nahezu konstant gehalten. Als Ergebnis zeigte sich, daß feinsandreichere Mischungen infolge des höheren Wassergehaltes eine höhere Schleuderintensität benötigten und daher weniger geeignet erschienen als sandärmere Mischungen. Unter

Beachtung des konstant vorgegebenen Ausbreitmaßes stieg der absolute Wasseranspruch trotz eines sinkenden w/z-Wertes für höhere Zementgehalte. Der Beton blieb dann auch nach längerem Schleudern noch naß.

Die Eignung des von Zollinger /43/ mit 50 cm angestrebten Ausbreitmaßes bestätigte sich auch bei den Versuchen von Meyer-Ottens /24/, der in einer eigenen Versuchsanlage Rohrabschnitte mit der Länge $l = 34,5$ cm und den Außendurchmessern $d_a = 24,5$ cm bzw. 45,5 cm schleuderte. Er fand heraus, daß sich immer dann eine gute Verteilung des Frischbetons im Rohr einstellte, wenn das Ausbreitmaß unabhängig vom w/z-Wert 48 cm und mehr betrug. Den nach Meyer-Ottens /24/ für das Schleudern günstigen Sieblinienbereich zeigt Bild 2.1.

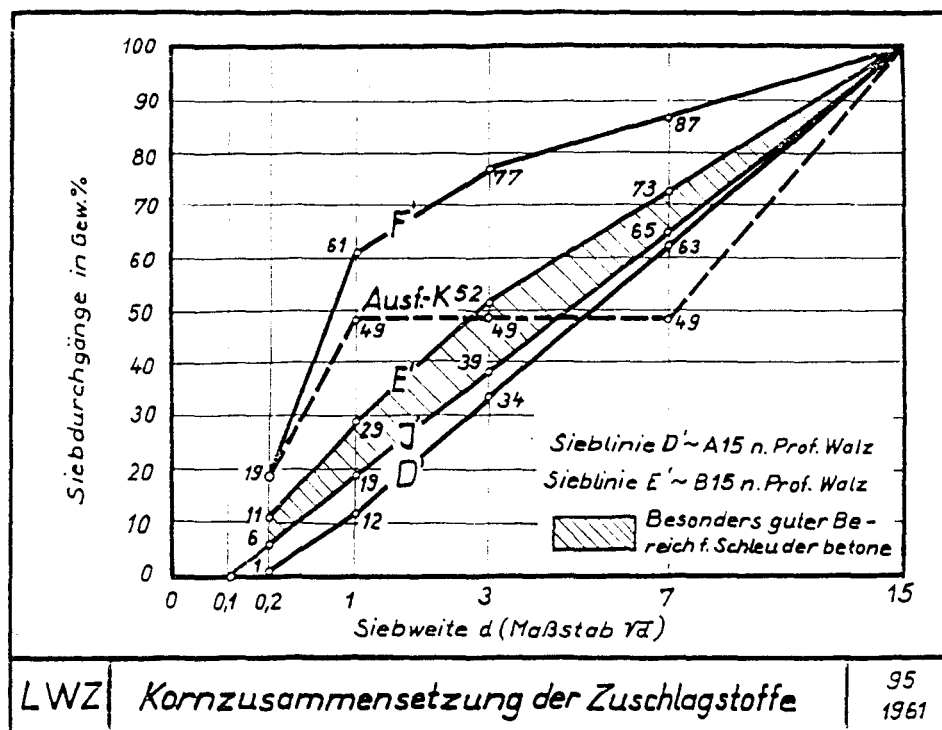


Bild 2.1: Günstiger Sieblinienbereich für Schleuderbeton nach /24/

Zur Frischbetonzusammensetzung gibt Bujard in /4/ einige Hinweise; Die Grenzwerte für den Sieblinienbereich nach Bild 2.1 enthält Tabelle 2.1. Von den verwendeten Zementarten ergaben die grob gemahlenen, spezifisch schwereren geringere Zement-Feinmörtel-Absonderungen und bessere Grünstandfestigkeiten.

| | unterer Grenzwert | oberer Grenzwert |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| Zementgehalt | 330 kg/m ³ | 400 kg/m ³ |
| Mehlkorngehalt | 425 kg/m ³ | 500 kg/m ³ |
| w/z-Wert | 0,5 | 0,6 |

Tab. 2.1: Empfohlene Grenzwerte für die Frischbetonzusammensetzung nach
/24/

Neuere Angaben zur Rezeptur von Schleuderbeton sind lediglich bei Rostan /34/ zu finden. Er gibt darin für die Produktion von Schleuderbetonmasten einen Zementgehalt von 440 kg/m³ an. Der w/z-Wert wird mit 0,43 und das Größtkorn zu 16 mm vorgegeben. Nach Beendigung des Schleuderns verbleibt ein mittlerer Zementgehalt von 395 kg/m³, der w/z-Wert sinkt auf 0,35 ab.

2.2.2 Angaben zum Schleudervorgang

Der Schleudervorgang wird vor allem durch die Schleudergeschwindigkeit und die Schleuderdauer bestimmt. Daneben können auch Verteilungs- und Beschleunigungsperioden, die der eigentlichen Verdichtungszeit vorangehen, Einfluß ausüben. Eine Zusammenstellung der Werte für in der Literatur beschriebene Schleudervorgänge enthält Tabelle 2.2. Sie belegt, daß sowohl für das Ausschleudern als auch die wesentlichen Kenngrößen - die Schleuderzeit und die Umdrehungszahl n - erhebliche Unterschiede festzustellen sind. Darüber hinaus fehlen vor allem neuere Angaben. Systematisch variiert wurden diese Größen bisher nur im Rahmen der Versuche von Meyer-Ottens /24/ und Bacsa /1/.

| Quelle | Anschleudern | Verdichtungsschleudern | | | Bemerkung |
|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|--|--|
| | | Schleuder- dauer t [min] | Umdrehungs- zahl n [U/min] | Geschwin- digkeit v [m/sec] | |
| Ros /33/ 1929 | V = 8 cm/sec. zum Füllen | 20 - 25 | ---- | 20,0 | ----- |
| Zollinger /43/ 1941 | ≈ 250-300 langsame Umdrehung | ---- | ≈ 480 | 5,0 | n ges. = 5000 Radius außen = 20 cm |
| Marquardt /22/ 1930 | 12 - 14 Min. u = 80 U/Min. | 20,0 | 170-300 | 17,8 bis 18,8 | Rohrherstel- lung |
| Goossen- aerts /8/ 1960 | 2 Min. lang- sam | 10,0 5+0,5 je 10 cm Rohr | ---- | 15,0 20,0 | Mastherstel- lung Rohrherstel- lung |
| Meyer- Ottens /24/ 1961 | 1 Min. mit 120 U/Min | 5,0-20,0 | 280-700 | 6,67 bis 16,7 | d _a = 45,5 cm |
| Bacsa /1/ 1981 | ----- | 8,0-15,0 | 300-900 | 5,0-20,0 | ----- |

Tab. 2.2: Zusammenstellung von Kenngrößen für den Schleudervorgang nach verschiedenen Autoren

2.2.3 Angaben zu charakteristischen Eigenschaften und zur Festigkeit von Schleuderbeton

Aus den im Abschnitt 2.1 zusammengestellten mechanischen Grundgleichungen zum Schleudern ist abzuleiten, daß auf die einzelnen Betandteile des Frischbetons unterschiedliche Fliehkräfte einwirken. Es ist bekannt, daß sich daraus der charakteristische Gefügebrau für Schleuderbetonquerschnitte ergibt, wie er auch im Bild 1.6 zu erkennen ist. Eine systematische Untersuchung des Fliehkrafteinflusses auf die Textur, also die Anordnung der Gefügeteile im Raum, wird von Obenauer /30/ beschrieben. Er weist

mit mikroskopischen Aufnahmen jeweils "vor" den Zuschlagkörnern stärker verdichtete Zonen nach und zeigt, daß die Verdichtung im Schleuderschatten der Zuschläge geringer ist. Es wird erläutert, daß dieses Mikrogefüge die Bruchflächen des Schleuderbetons bestimmt. Für plattige Zuschlagkörner zwischen 1,5 - 30 mm wird eine Anordnung der Körner zu einem schiefrigen Gefüge nachgewiesen und grafisch dargestellt. Es wird gezeigt, daß bei Verwendung von genügend kleinen Zuschlägen und ausreichendem Rundkornanteil ein schiefriges Gefüge mit zu geringer Verzahnung vermieden werden kann.

Angaben zum Einfluß der bei Schleuderbeton gegebenen Gefügearrangement auf die Festigkeiten in verschiedenen Richtungen und Querschnittszonen sind in der Literatur bisher nicht zu finden. Es werden lediglich vereinzelte Festigkeitswerte genannt. Ros gibt in /33/ aus der Überprüfung von 80 "Vianini-Rohren" folgende Werte an:

mittlere Betondruckfestigkeit der Rohrwandung $\beta_{bu} = 40 \text{ N/mm}^2$

Betonzugfestigkeiten, ermittelt an:

| | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| Balken unter einer Einzellast | $\beta_{BZ} = 4,5 \text{ N/mm}^2$ |
| unter Scheiteldruck | $\beta_{SZ} = 6,0 \text{ N/mm}^2$ |
| Ringzugfestigkeit bei Innendruck | $\beta_{RZ} = 4,0 \text{ N/mm}^2$ |

Heute werden insbesondere bei der Mastfertigung deutlich höhere Festigkeiten erreicht. Bacsa /1/ nennt für eine übliche Produktion ohne erhöhte Anforderungen Druckfestigkeiten bis zu 70 N/mm^2 und Biegezugfestigkeiten bis etwa 15 N/mm^2 .

2.3 Schäden an Schleuderbetonbauteilen

Eine ganze Reihe neuerer Veröffentlichungen belegt, daß in den vergangenen Jahren auch Schäden an Schleuderbetonbauteilen, insbesondere Masten, entstanden sind /2,5,7,9,31,28,39,41,42/. Die möglichen Schadensbilder für Masten geben Griesse und Müller /9/ wie folgt an:

- netzartige Haarrisse

Diese Risse haben in der Regel für die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit keine Bedeutung.

- Querrisse

Diese Risse entstehen aus Biegebeanspruchungen; als Schaden sind sie nur einzustufen, wenn sie unzulässig große Breiten erreichen, bei Stahlbetonbauteilen $w > 0,4 \text{ mm}$.

- Risse an den Formtrennnähten

- lotrechte Längsrisse außerhalb der Formtrennnähte

- Abplatzungen an der Oberfläche

- Torsionsschäden

- Schäden an Querträgern

| | MKW 3147 Maste | 12765 Maste | Mastauführung vor- gespannt | schlaff armiert |
|---------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Risse an den Formtrennnähten | 48 % | 45 % ¹⁾ | 22 % | 65 % |
| sonstige Längsrisse | 43 % | 51 % ¹⁾ | 61 % | 58 % |
| Querrisse | 12 % | 17 % ¹⁾ | 3 % | 34 % |
| Abplatzungen | 15 % | 12 % ¹⁾ | 11 % | 11 % |
| Torsionsrisse | 1 % | 2 % ¹⁾ | 3 % | 3 % |
| Schäden an den Querträgern | 3 % | 4 % ¹⁾ | 4 % | 4 % |

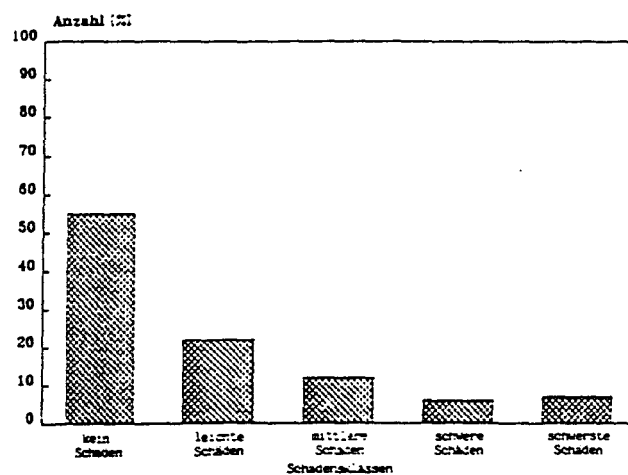


Bild 2.2: Ergebnisse einer Schadenserkennung von Müller und Griese /9/ an ≈ 13.000 Masten vorwiegend aus den Jahren 1960 - 1970

Die Schadenshäufigkeit und die Verteilung der Schadensarten ist aus einer Schadenserhebung abzulesen, bei der etwa 13.000 vorwiegend zwischen 1960 und 1970 eingebaute Betonmaste erfaßt wurden. Die Zusammenstellung in Bild 2.2 zeigt, daß vorgespannte Maste weniger Risse in Querrichtung und an den Formtrennnähten aufweisen. Die Schäden durch Längsrisse außerhalb der Formtrennnähte traten bei Stahlbeton- wie bei Spannbetonmasten mit annähernd gleicher Häufigkeit auf.

Eine umfassende Analyse der Schadensursachen geben Brandt und Fiß in /12/ sowie Wagner in /38/. Neben Überbeanspruchungen infolge äußerer Lasten, die zu den bekannten Schadensbildern bzw. Versagensarten führen und mit den üblichen Bemessungsansätzen des Stahlbeton- oder Spannbetonbaus vermieden werden können, ist vor allem den Zwangbeanspruchungen bei der Schädigung von Schleuderbetonbauteilen Bedeutung beizumessen. Solche Zwangbeanspruchungen sind gerade für die häufigen Längsrisse in hohem Maße verantwortlich (siehe Bild 2.2), die sich zudem auf die Dauerhaftigkeit besonders nachteilig auswirken können. Sie entstehen i.d.R. aus Temperaturbeanspruchungen sowie aus dem Schwinden und Quellen des Betons.

Temperaturwirkungen ergaben unter einseitiger Sonnenbestrahlung oder bei schockartiger Abkühlung die höchsten Zugbeanspruchungen. Wegen der feinkörnigen, mit Zementstein angereicherten Ablagerungen auf der Innenseite der Hohlprofile, entstehen jedoch auch bei gleichmäßiger Erwärmung Zugspannungen an der Außenseite. Aus unterschiedlicher Durchfeuchtung folgen nennenswerte Zugspannungen an der Außenfläche, wenn innen am Mastfuß Wasser steht und eine hohe Innenfeuchte quellen der bindemittelreichen Innenzonen bewirkt, das mit trockenen Mastaußenwänden zusammentrifft. Eine Übersicht zur Größenordnung der zu erwartenden Biegezugspannungen ist in Bild 2.3 dargestellt.

Ein seltener Fall, der allerdings ebenfalls sehr ungünstige Zugbeanspruchungen hervorruft, ist die Eisbildung in der feuchten Innenwand. Als chemische Beanspruchung sind Treiberscheinungen einzustufen, bei denen sich vornehmlich in Rissen nadelförmige Kristalle (z.B. Ettringit, Thaumasit) bilden /50/. Diese Neubildungen können infolge einer Wärmebehandlung entstehen, wenn hohe Temperaturen bei der Hydratation die Sulfatbindung beeinträchtigen und sich die nur locker gebundenen Sulfate unter Betriebsbedin-

gungen bei Normaltemperatur in Mischkristalle umbilden /50/. Vor allem zur Aufweitung vorhandener Risse können solche Treiberscheinungen beitragen.

| Querschnitt am Mastfuß | Bruchmoment M in kNm | | | Tragfähigkeits- minderung % | Bemerkungen |
|---------------------------|-------------------------|------|------|-----------------------------------|---|
| | B 35 | B 45 | B 55 | | |
| 8 Ø14 BSt 420/500 | | | | | |
| | 60,4 | 61,7 | 62,4 | 100 | unbeschädigter Querschnitt |
| | 45,5 | 46,2 | 46,7 | = 25 | Wegfall eines Bewehrungs- stahles in der Zugzone |
| | 53,3 | 54,0 | 54,4 | = 12 | Abplatzungen in der Betondruckzone |
| 16 Ø10 BSt 420/500 | | | | | |
| | 60,7 | 61,8 | 62,5 | 100 | unbeschädigter Querschnitt |
| | 53,0 | 54,0 | 54,6 | = 13 | Wegfall eines Bewehrungs- stahles in der Zugzone |
| | 54,0 | 54,6 | 54,9 | = 12 | Abplatzungen in der Betondruckzone |

Bild 2.3: Tragfähigkeitsminderung bei typischen Schadensbildern

Eine Beurteilung der Schadensauswirkungen liefern Görrissen, Griesse, Thierauf /7/. Sie geben aufgrund von experimentellen Untersuchungen an geschädigten Masten und Berechnungen Tragsicherheitsabminderungen für unterschiedliche Schadensbilder an. Die rechnerisch bestimmten Schädigungsgrade unter Biegebeanspruchungen sind in Bild 2.3 zusammengestellt. Deutlich hö-

here Tragsicherheitsabminderungen entstehen unter Torsionsbeanspruchungen von Masten, die Längsrisse aufweisen. Bereits für nicht durchgehende Längsrisse wird eine Tragsicherheitsminderung um 56 % errechnet. Für einen über die gesamte Mastlänge offenen Riß steigt dieser Wert auf 72 %.

Zur Schadensbehebung sind in den vergangenen Jahren, vor allem im Rahmen der Entwicklung von Reparatur- und Ersatzsystemen für Beton, auch Ausbesserungs- und Instandsetzungsverfahren für Schleuderbetonmaste entstanden. Besondere Aufmerksamkeit ist bei der Ertüchtigung von Masten auf die Schaffung einer ausreichenden Innenbelüftung zu verwenden. Sie soll den Abbau der hohen Luftfeuchtigkeit ermöglichen, die sich als Folge von Undichtigkeiten oder als Kondensfeuchte infolge von Feuchte- und Temperaturwechseln im Mastinnern einstellt. Um das Quellen der inneren zementsteinreichen Feinteilschicht zu verhindern, ist das Aufbringen von Hydrophobierungsmitteln auf den Mastinnenseiten anzustreben. Dafür können Schläuche mit entsprechend geeigneten Düsen verwendet werden. Gelegentlich hat man auch die besonders gefährdeten unteren Bereiche mit einem Hydrophobierungsmittel geflutet und dieses anschließend wieder abgesaugt /5/.

Zumindest in der Bundesrepublik Deutschland wurden zwischenzeitlich bei den maßgebenden Schleuderbetonherstellern **Schadensfolgerungen** für die zukünftige Produktion abgeleitet und eingeführt. Als wichtigste Maßnahmen beschreibt Wagner /38/:

- die Erhöhung des Bewehrungsgrades der Wendelbewehrung und die Verwendung profilierter oder gerippter Stähle für diese Bewehrung,
- die Vergrößerung der Wanddicke,
- Änderungen der Betonzusammensetzung und des Schleudervorgangs, um die innere Feinkornschicht so weit wie möglich zu verringern,
- Veränderung der Wärmebehandlung um die anschließende Mischkristallbildung auszuschließen,
- äußerer Feuchtigkeitsschutz des Masts, u.U. auch im Inneren.

Daß intakte Schleuderbetonbauteile eine sehr hohe Dauerhaftigkeit aufweisen, zeigen z. B. die von Weber in /39/ aufgeführten Karbonatisierungsmes-

sungen. An 20 - 30 Jahre alten Masten, die zum Teil extremen Witterungsbeanspruchungen ausgesetzt waren, wurden nur in Einzelfällen Karbonatisierungstiefen größer als 2 mm gemessen.

3. Eigene Versuche zum Schleudern von Beton

3.1 Zielsetzung der Versuche

Die Auswertung der Literatur zum Kenntnisstand über das Verdichten des Betons mit dem Schleuderverfahren hat gezeigt, daß bisher kaum systematische Untersuchungen bestehen, die den Einfluß der wichtigsten Parameter im Hinblick auf die Festigkeit und das Verformungsverhalten des Schleuderbetons beschreiben. Auch Aussagen zum Einfluß der gefügeregelnden Zentrifugalkraftwirkung auf Festigkeitsunterschiede in den Hauptrichtungen wurden bisher nicht untersucht. Um zukünftig Schäden sicherer zu vermeiden und erweiterte Anwendungen für Schleuderbeton zu ermöglichen, sind jedoch zuverlässige Aussagen zur Auswirkung von Änderungen der bedeutsamen Schleuderparameter unerläßlich. Das im Rahmen dieser Forschungsarbeit konzipierte Versuchsprogramm soll dazu beitragen.

3.2 Versuchsdurchführung

3.2.1 Schleudermaschine

Wegen der großen Anzahl von Probekörpern, die sich bei einer Variation mehrerer Parameter ergibt, war es notwendig eine eigene Schleudermaschine zu bauen. Eine Ansicht dieser Maschine zeigen die Bilder 3.1 und 3.2.

Der Aufbau der eigenen Schleudermaschine entsprach dem Typ der sog. Rollenbank. Die Schalungstrommel wurde in Spurrillen geführt, die zur Erzielung eines schlupffreien Antriebes und eines erschütterungsarmen Laufes mit Gummi belegt waren. Es standen zwei 17 cm lange Schalungstrommeln mit einem Durchmesser zur Verfügung, der sich von 18 cm auf 18,3 cm konisch veränderte. Zum Entschalen konnten die Formen an beiden Stirnseiten geöffnet werden. Die Rollenbank wurde über einen Keilriemen von einem stufenlos re-

gelbaren Getriebemotor angetrieben. Die Anzahl der Umdrehungen konnte unmittelbar in der Achse der Schalungsform mit einem Drehzahlmesser bestimmt werden.

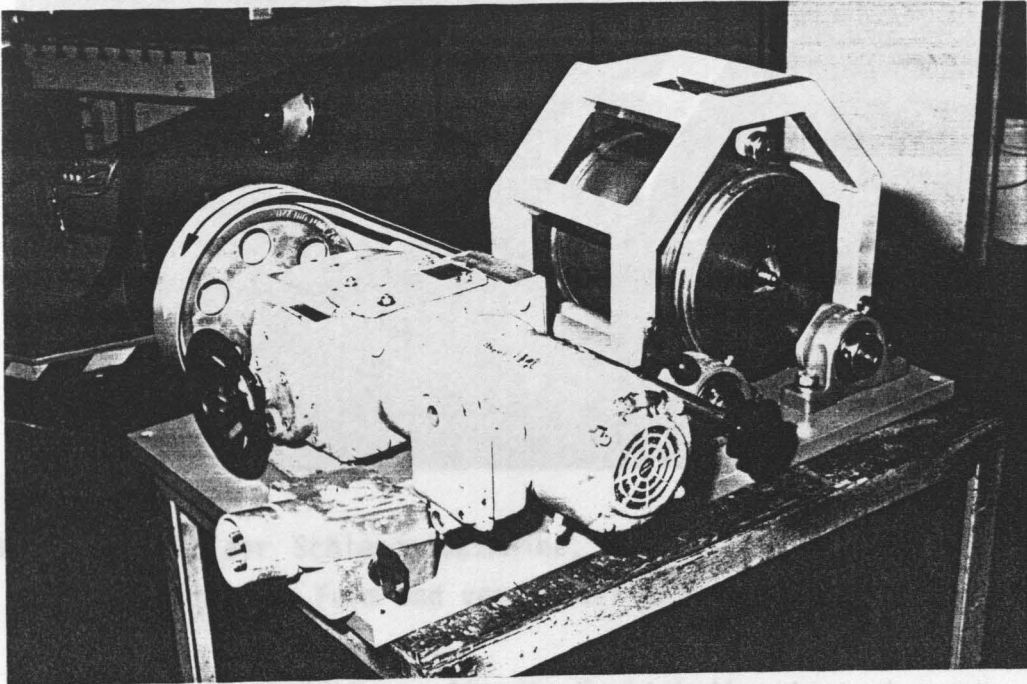


Bild 3.1: Ansicht der Schleudermaschine, Getriebemotor und gesicherte Schalungsform

Da für die Schleuderversuche nur zwei Schalungsformen zur Verfügung standen und zu beachten war, daß alle vorgesehenen Prüfungen nach 26 Tagen erfolgen sollten, wurden je Herstellungstag zwei Zylinder geschleudert. Der Beton wurde gleichzeitig für beide Schleudervorgänge gemischt. Die Mischung des zweiten Versuchskörpers jedes Herstellungstages war also entsprechend der Dauer des ersten Schleudervorgangs alter. Solche geringen Altersunterschiede von 20 - 30 Minuten sind auch in Schleuderversuchen durchaus möglich, da die entscheidende Bedeutung: Um die Vergleichsmöglichkeit bei der Variation der Schleudervorgänge nicht zu beeinträchtigen, wurde während des gesamten Schleudersprogramms der gleiche Zuschlag verwendet. Auch dieses Vorgehen entspricht weitgehend der üblichen Praxis in Schleuderversuchen, die ihren Zuschlag ebenfalls nur in sehr engen Grenzen verändern bzw. möglichst konstant halten. Eine Übersicht zu den Konstanten des verwendeten Zuschlagsgutes gibt Tabelle 2.1.

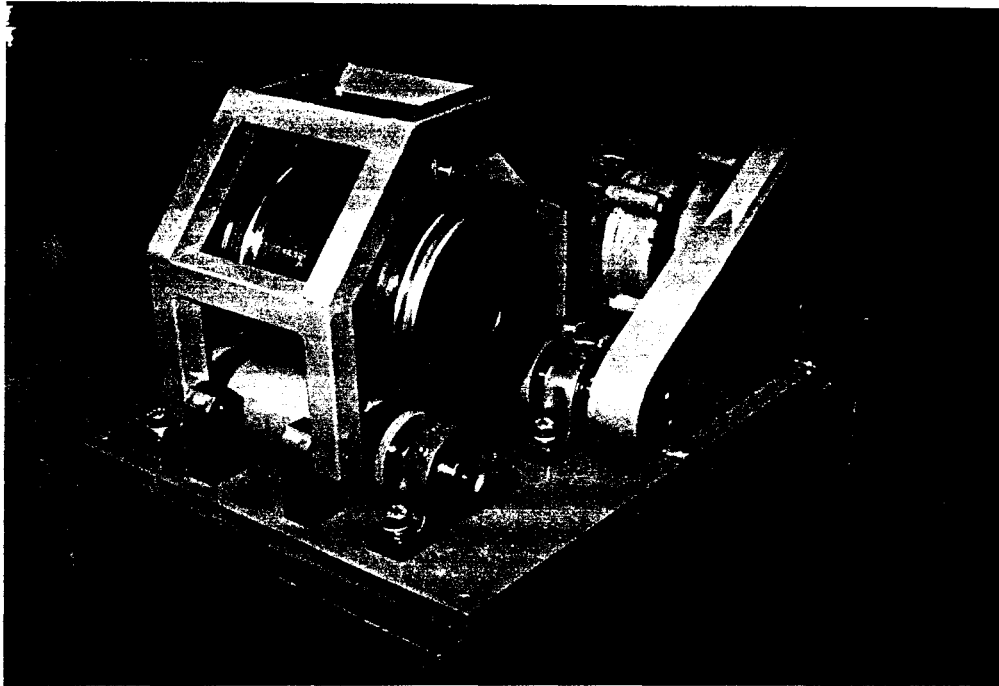


Bild 3.2: Ansicht der Schleudermaschine, Rollenbank, Schalungsform, Lage-
sicherung der Form und verdeckter Antriebsriemen

3.2.2 Herstellung der Prüfkörper für die Festigkeitsuntersuchungen

Da für die Herstellung der Schleuderbetonzylinder nur zwei Schalungsformen zur Verfügung standen und zu beachten war, daß alle vorgesehenen Prüfungen nach 28 Tagen erfolgen sollten, wurden je Herstellungstag zwei Zylinder geschleudert. Der Beton wurde gleichzeitig für beide Schleudervorgänge gemischt. Die Mischung des zweiten Versuchskörpers jedes Herstellungstages war also entsprechend der Dauer des ersten Schleudervorgangs älter. Solche geringen Altersunterschiede von 20 - 30 Minuten sind auch in Schleuderbetonwerken durchaus möglich, aber ohne entscheidende Bedeutung. Um die Vergleichsmöglichkeit bei der Variation der Schleuderparameter nicht zu beeinträchtigen, wurde während des gesamten Schleuderprogramms der gleiche Zuschlag verwendet. Auch dieses Vorgehen entspricht weitgehend der üblichen Praxis in Schleuderbetonwerken, die ihre Zuschläge ebenfalls nur in sehr engen Grenzen verändern bzw. möglichst konstant halten. Eine Übersicht zu den Kornanteilen des verwendeten Zuschlaggemisches gibt Tabelle 3.1.

| | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|------|-------|
| Korngruppe | 0/1 | 0/2 | 2/8 | 8/16 | 16/32 |
| Anteil in % | 25 | 10 | 40 | 25 | - |

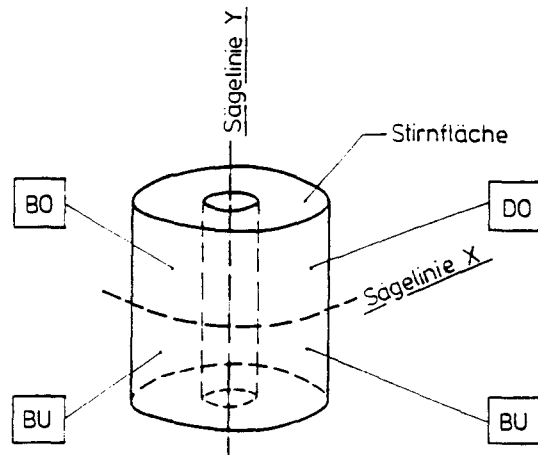
Tab. 3.1: Korngruppenanteile in Gew.-%

Auf den Einsatz von Zusatzmitteln wurde verzichtet. Der Zement und der w/z-Wert wurden im Rahmen des Schleuderprogramms verändert.

Nach dem Mischen des Frischbetons wurde die runde Schalungsform so weit gefüllt, daß der nach dem Schleudern zu erwartende Durchmesser des inneren Hohlraums etwa der Schichtdicke des zylindrischen Betonkörpers entsprach. Dieses Verhältnis gewährleistete ebenso wie der Probekörperdurchmesser, der mit 18 cm etwa im Bereich des unteren Grenzwertes baupraktisch üblicher Schleuderbetonbauteile lag, daß sich über die Wanddicke der gefügeregelnde Einfluß der Zentrifugalkraft ausbilden konnte. Die Handhabung und Herstellung der Probekörper konnte jedoch noch von einer Person ausreichend sorgfältig ausgeführt werden.

Die gefüllte Form wurde verschlossen und auf die Rollenbank gelegt. Im Anschluß an eine wegen der geringen Betonmenge kurze Verteilungszeit von etwa 1 - 2 Minuten, wurde die angestrebte Schleudergeschwindigkeit eingestellt und im Verlauf der Schleuderdauer konstant gehalten. Am Schleuderende wurde die Geschwindigkeit rasch verringert. Die Schalungsform wurde sehr vorsichtig von der Rollenbank genommen und anschließend zum Abgießen des überschüssigen Wassers geöffnet. Etwa nach weiteren 15 Minuten wurde der Betonzylinder ausgeschalt.

Dieser frühe Ausschalungstermin, der gewählt werden mußte, weil nur 2 Schalformen zur Verfügung standen, entspricht nicht den Abläufen in Schleuderbetonwerken und birgt zudem die Gefahr, daß durch Reibung Schäden außen im oberflächennahen Betongefüge hervorgerufen werden, die vor allem zu einer Verminderung der Betonzugfestigkeit führen könnten. Da jedoch alle Probekörper frühzeitig ausgeschalt wurden, bleiben diese Festigkeitswerte vergleichbar.



| | |
|----|--------------------|
| BU | = Biegezug , unten |
| BO | = Biegezug , oben |
| DU | = Druck , unten |
| DO | = Druck , oben |

Bild 3.3: Einteilung der Schleuderbetonabschnitte in Prüfkörper

4. Untersuchungsprogramm

4.1 Variation der Parameter

Für eine gezielte Variation der Einflüsse aus der Betonrezeptur wurde die Herstellung der Schleuderbetonzylinder auf der eigenen Maschine in fünf Serien eingeteilt. Damit unterschieden sich die Serien in folgenden Größen:

- w/z-Wert
- Zementgehalt
- Zementgüte

Neben dem w/z-Wert von 0,5 der etwa in der Größenordnung der in Schleuderbetonwerken gebräuchlichen w/z-Werte liegt, wurden auch Versuchskörper mit dem w/z-Wert 0,6 geschleudert. Ausgehend von einer Betonmischung mit 400 kg/m^3 Zement wurden Mischungen mit 350 kg/m^3 , 375 kg/m^3 und 450 kg/m^3 untersucht. Der verwendete Portlandzement entsprach den Güten 45 F und

55 F. Damit ergab sich die in Tabelle 4.1 mit den maßgebenden Kenngrößen aufgetragene Serieneinteilung.

Innerhalb der nach baustoffbedingten Einflüssen zusammengestellten Serien, wurde der Schleudervorgang wie folgt variiert:

- Schleuderdrehzahlen n zwischen 200 und 550 Umdrehungen pro Minute
- Schleuderdauer zwischen $t = 7$ min. und $t = 20$ min.

Die Probekörper zur Bestimmung des E-Moduls wurden in der Serie E gesondert hergestellt.

| Serie | w/z-Wert | Zement | | Schleudervorgang | |
|--------------|----------|-----------------------------------|--------|---------------------|----------------|
| | | Gehalt [kg/m ³] | Güte | Drehzahl [U/min] | Dauer [min] |
| Hauptserie 1 | 0,5 | 400 | PZ 45F | 200 - 550 | 7 - 20 |
| Hauptserie 2 | 0,6 | 400 | PZ 45F | 300 - 550 | 7 - 20 |
| Serie A | 0,6 | 350 | PZ 45F | 300 - 500 | 10, 20 |
| Serie B | 0,5 | 450 | PZ 45F | 300 - 500 | 10, 20 |
| | 0,6 | | | 300, 500 | |
| Serie C | 0,5 | 400 | PZ 55F | 300 - 500 | 10, 20 |
| | 0,6 | | | 300 - 500 | |
| Serie D | 0,6 | 375 | PZ 45F | 300, 500 | 10, 20 |
| Serie E | | Probekörper zur E-Modulbestimmung | | | |

Tab. 4.1: Übersicht zu den Schleuderserien

4.2 Versuchsaufzeichnungen und begleitende Messungen

Neben den gezielt variierten Parametern wurden bei der Herstellung jedes Probekörpers noch weitere Größen begleitend gemessen. Unmittelbar vor dem Schleudern wurden jeweils das Ausbreitmaß und die Temperatur der Mischung bestimmt. An den erhärteten Zylinderabschnitten wurde vor dem Zersägen in

Halbschalen (siehe Bild 3.3) der Durchmesser des inneren Hohlraumes und die mittlere Dicke der zementreichen Feinteilschicht gemessen. Da die Füllmenge der Schleuderformen nach Gewicht bestimmt und konstant gehalten wurde, gibt der Durchmesser des inneren Hohlraums einen Hinweis auf die beim Schleudern erzielte Verdichtung. Die mittlere Dicke der Feinteilschicht deutet auf die Entmischungsneigung hin.

Vor den Festigkeitsprüfungen wurde die Gesamtdicke der Wand jedes Halbzylinders als Mittelwert aus den Messungen in 3 Schnitten bestimmt. Ebenso wurde auch die nach dem Zersägen des Schleuderabschnittes verbliebene Höhe jeder Zylinderhalbschale gemessen.

Gemeinsam mit den variierten Parametern sind die Ergebnisse dieser begleitenden Messungen in der Anlage 1 für jeden einzelnen Versuchskörper zusammengestellt.

4.3 Festigkeitsuntersuchungen

Im Alter von 28 Tagen wurde an jeweils 2 der entsprechend Bild 3.3 aus den Schleuderbetonabschnitten herausgesägten Halbringe die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit geprüft. Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit erfolgte in weggesteuerten Versuchen, wobei in der Achse der Halbringenden Druckkräfte eingeleitet wurden. Aus den Bruchkräften und den geometrischen Abmessungen der Prüfkörper kann die im Hinblick auf die Rißbildung besonders interessierende Betonzugfestigkeit in Ringrichtung errechnet werden. Den Versuchsaufbau und die zur Spannungsermittlung maßgebenden geometrischen Größen verdeutlicht Bild 4.1.

Dieser Versuchsaufbau ruft Zugspannungen an der Außenseite hervor; eine Ermittlung der Betonzugfestigkeiten der feinteilreichen Innenseite wurde unterlassen, einerseits um die Anzahl der Prüfkörper zu begrenzen, andererseits deswegen, weil Zugspannungen innenseitig nur in ungewöhnlichen Sonderfällen zu erwarten sind.

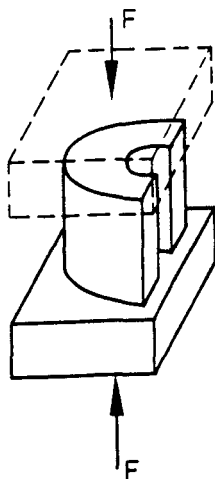
Naturgemäß wurde auch die Druckfestigkeit - parallel zur Schleuderachse - an Halbringen bestimmt. Die Anordnung des Halbrings zwischen den Druckplatten der Prüfmaschine zeigt Bild 4.2. Für den Vergleich der Schleuderbetondruckfestigkeit mit der Druckfestigkeit eines gerüttelten Betons wurde aus

jeder Mischung ein Würfel mit den Kantenlängen 150 mm gemäß DIN 1048 hergestellt, gelagert und nach 28 Tagen geprüft. Alle Festigkeitswerte sind ebenfalls in der Anlage 1 zusammengestellt.



Prüfung auf Biegezugfestigkeit β_{BZH}
nach 28 Tagen
in der Druckpresse

Bild 4.1: Versuchsanordnung für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit an Halbringen; Betonalter ~ 28 Tage



Prüfung auf Druckfestigkeit β_{CH}
nach 28 Tagen
in der Druckpresse

Bild 4.2: Ermittlung der Druckfestigkeit β_{CH} am Halbring;
Betonalter ~ 28 Tage

5. Ergebnisse der eigenen Schleuderversuche

5.1 Darstellung der Versuchsergebnisse

Alle Versuchsergebnisse wurden mit den variierten Parametern und den charakteristischen Größen in der Anlage 1 zunächst tabellarisch zusammengestellt. Darüberhinaus wurden die Ergebnisse in den Bildern der Anlage 2 graphisch aufgetragen. Dabei wurden sowohl die Festigkeiten als auch die wesentlichen geometrischen Größen berücksichtigt. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten und die Zuordnung zu den Tabellen zu erleichtern, wurden alle Größen in Abhängigkeit der Schleuderdrehzahl n dargestellt.

5.2 Charakteristische Merkmale der Versuchsserien

5.2.1 Hauptserie 1

Im Rahmen der 1. Hauptserie (siehe Anlage 1, Blatt 1 und 2) wurden die Schleuderdrehzahl zwischen $n = 200 - 500$ U/min und die Schleuderzeit zwischen $t = 7 - 20$ min. am umfassendsten variiert. Die Ergebnisse dieser Serie können daher mit den Ergebnissen aller anderen Serien verglichen werden. Für alle Mischungen dieser Serie wurde mit Werten von 35 cm bis 37 cm ein sehr ausgeglichenes Ausbreitmaß erreicht. Mischungsabweichungen haben daher nur eine untergeordnete Rolle gespielt, so daß auffällige Unterschiede den Schleudereinflüssen zugewiesen werden können. Auch die geringe Streubreite der an den Vergleichswürfeln ermittelten Festigkeiten deutet auf die Gleichmäßigkeit der Mischungen hin. Im einzelnen läßt die 1. Hauptserie folgende auffällige Tendenzen erkennen:

- Der Durchmesser des inneren Hohlraums und die mittlere Wanddicke weisen bei der Drehzahl $n = 400$ U/min für alle Schleuderdauern eine geringe Streuung auf. Für Drehzahlen $n > 400$ wurde nach kurzen Schleuderdauern noch eine größere Wanddicke und ein geringerer Hohlraumdurchmesser gemessen. Möglicherweise sind sehr hohe Drehzahlen für eine Verdichtung über die gesamte Querschnittsdicke von geringerem Einfluß als längere Schleuderdauern.

- Hinweise zur Entmischungstendenz gibt die Dicke der inneren Feinanteilschicht. Sie ist bei $n = 200$ U/min kaum erkennbar und wird dann mit steigender Drehzahl zunächst größer. Über $n = 400$ U/min ist die Verdichtungsenergie offensichtlich so groß, daß sich auch die Dicke der Feinanteilschicht wieder verringert. Mit Feinteilschichtdicken - deutlich unter 10 mm - bestand jedoch insgesamt keine ausgeprägte Entmischungsneigung.
- Bei Versuchskörpern, die mit niedriger Drehzahl $n = 200$ U/min geschleudert wurden, ergaben sich deutlich geringere Druckfestigkeiten. Auch für die kurze Schleuderdauer $t = 7$ min ist die Tendenz zur Druckfestigkeitsverminderung erkennbar. Diese Beobachtungen weisen erneut auf die Bedeutung der Schleuderdauer hin.

5.2.2 Hauptserie 2 (Anlage 1, Bl. 3 u. 4)

Der bei der 2. Hauptserie gegenüber der 1. Hauptserie auf 0,6 erhöhte w/z-Wert, mit dem bei allen Mischungen auch das Ausbreitmaß auf über 50 cm anstieg, führte dazu, daß mit der geringen Drehzahl $V = 200$ U/min keine zylindrischen Versuchskörper hergestellt werden konnten, die unmittelbar nach Beendigung des Schleudervorgangs ausreichend standfest waren. Nachfolgend seien die wichtigsten Merkmale kurz erläutert:

- Die mittlere Wanddicke der Probekörper und der Durchmesser des inneren Hohlraums weisen mit steigender Drehzahl eine deutliche Veränderung auf. Weil sich beide Werte gegenseitig ergänzen, ist die Tendenz naturgemäß entgegengesetzt. Bei der Drehzahl $n \geq 300$ U/min werden offensichtlich am Wandinnern vom Überschußwasser Bestandteile ausgewaschen.
- Die Dicke der Feinanteilschicht weist höhere Werte und eine größere Streubreite als bei der 1. Hauptserie auf. Mit steigender Drehzahl ist eine Abnahme der Schichtdicke erkennbar.
- Die Druckfestigkeit β_{CH} und die Biegezugfestigkeit β_{BZH} veränderten sich hier nicht mit der Drehzahl. Die mittlere Druckfestigkeit ist im Vergleich zur 1. Hauptserie deutlich geringer. Gegenüber den Druckfestigkeiten der Vergleichswürfel ist jedoch noch immer eine höhere Druckfestigkeit vorhanden.

5.2.3 Serie A (Anlage 1, Bl. 5)

Bei den im Rahmen der Serie A geschleuderten Mischungen war der Zementgehalt von 400 kg/m^3 auf 350 kg/m^3 gegenüber der 2. Hauptserie vermindert. Mit gleichbleibendem w/z-Wert von 0,6 ergaben sich so wegen der geringeren Wassermenge kleinere Ausbreitmaße mit einer Streuung zwischen 41 und 43 cm. Auf die Versuchsergebnisse hatte diese Änderung folgende Auswirkungen:

- Bei der Drehzahl $n = 300 \text{ U/min}$ ergab sich ein deutlich größerer Durchmesser des inneren Hohlraums und eine geringere Wanddicke als bei höheren Drehzahlen.
- Eine erkennbare Verminderung der Feinanteilschichtdicke ist erst bei hoher Drehzahl $n = 500 \text{ U/min}$ festzustellen.
- Tabelle 5.1 belegt, daß die Druckfestigkeit bei gleichen w/z-Werten aber geringeren Zementgehalten die Werte der 2. Hauptserie überschreitet. Die Verlängerung der Schleuderdauer von 10 min. auf 20 min. ergibt Festigkeitssteigerungen.

| Drehzahl | Schleuder- dauer [min.] | Druckfestigkeit β_{CH} [N/mm ²] | | |
|----------|-------------------------------|---|---------------|---------|
| | | 1. Hauptserie | 2. Hauptserie | Serie A |
| 300 | 10 | 63,78 | 54,25 | 60,4 |
| | 20 | 70,58 | 58,08 | 67,05 |
| 400 | 10 | 63,25 | 58,55 | 60,73 |
| | 20 | 70,08 | 59,6 | 65,4 |

Tab. 5.1: Vergleich der mittleren Druckfestigkeiten β_{CH} aus den Serien 1, 2 und A

5.2.4 Serie B (Anlage 1, Bl. 6)

Bei der Serie B ergab der auf 450 kg/m^3 erhöhte Zementgehalt bei w/z = 0,6 sehr hohe Ausbreitmaße zwischen 59 cm und 63 cm. Es wurden deshalb auch Mischungen mit dem w/z-Wert von 0,5 und Ausbreitmaßen zwischen 40 cm und

44 cm geschleudert. Die Ergebnisse lassen deutliche Unterschiede zwischen beiden Teilserien erkennen:

- Ein für die eingebrachte Mischungsmenge ausgewogener Querschnitt, bei dem die Wanddicke etwa dem Durchmesser des inneren Hohlraums entspricht, wird bei $w/z = 0,5$ bereits mit $n = 400$ U/min. erreicht, bei $w/z = 0,6$ dagegen erst mit $n = 500$ U/min.
- Die Dicke der Feinteilschicht ist bei $w/z = 0,5$ für $n = 300$ U/min. zunächst größer, verringert sich aber für $n = 500$ U/min. gegenüber den Werten der Mischungen mit $w/z = 0,6$.
- Die Druckfestigkeit β_{CH} ist für Mischungen mit $w/z = 0,5$ ab der Drehzahl $n = 400$ U/min. deutlich höher als mit $w/z = 0,6$.
- Bei $w/z = 0,5$ steigt die Biegezugfestigkeit β_{BZH} mit der Drehzahl an.
- Die von der Drehzahl abhängige Veränderung der Druckfestigkeit β_{CH} ist für $w/z = 0,5$ und $0,6$ unterschiedlich.

5.2.5 Serie C (Anlage 1, Bl. 7 u. 8)

Für die Mischungen der Serie C wurde Portlandzement der Güte 55 F verwendet. Es wurden wiederum Mischungen mit den w/z -Werten $0,5$ und $0,6$ untersucht. Die Ausbreitmaße der Mischungen mit $w/z = 0,5$ lagen zwischen 28 cm und 33 cm. Für $w/z = 0,6$ ergaben sich Ausbreitmaße von 45 cm bis 49 cm.

- Bei allen Versuchen mit $w/z = 0,5$ entspricht die Querschnittsgeometrie nach dem Schleudern (Wanddicke \approx Durchmesser des inneren Hohlraums) den erwarteten Verhältnissen. Gegenüber den Mischungen mit $w/z = 0,6$, bei denen die der Füllung entsprechende Wanddicke von ungefähr 60 mm erst mit der Drehzahl $n = 530$ U/min. erreicht wurde, ist jedoch eine größere Streubreite vorhanden.
- Bei den Mischungen mit $w/z = 0,6$ ist die Feinteilanreicherung an der Innenseite gleichmäßiger ausgeprägt und weist im Mittel eine größere Schichtdicke auf.

- Die mittleren Festigkeiten der mit $w/z = 0,5$ hergestellten Versuchskörper sind größer als die mit $w/z = 0,6$ geschleuderten Proben.

5.2.6 Serie D (Anlage 1, Bl. 9)

Die Betonmischungen der Serie D wiesen Ausbreitmaße zwischen 40 cm und 50 cm auf. Bei der Drehzahl $n = 500$ U/min. ergaben sich gegenüber der Drehzahl $n = 300$ U/min. kleinere Wanddicken und ein größerer Durchmesser des inneren Hohlraums. Dagegen veränderten sich sowohl die Dicke der Feinteilschicht als auch die Festigkeiten mit steigender Drehzahl kaum.

5.3 Darstellung der untersuchten Parametereinflüsse und Vergleich der Versuchsserien

5.3.1 Druckfestigkeit des Schleuderbetons (siehe auch Anlage 1, Bl. 10)

Die Druckfestigkeit ist insbesondere für die Konzeption schlanker Schleuderbetonbauteile von Interesse. Als maßgebende kennzeichnende Größe gibt sie darüberhinaus Hinweise auf die Güte des Betons, weil für wesentliche Eigenschaften ein Bezug zur Druckfestigkeit hergestellt werden kann. In Tabelle 5.2 sind die mittleren Druckfestigkeiten $\beta_{CH,28}$ aller Serien für Schleuderdrehzahlen $n = 200, 400$ und 500 U/min. sowie für Schleuderdauern $t = 10$ min. und 20 min. zusammengestellt. Insgesamt ist zunächst festzustellen, daß bei allen Versuchskörpern ein sehr hohes Druckfestigkeitsniveau vorlag. Zwischen den Serien sind allerdings ebenso deutliche Festigkeitsunterschiede erkennbar, wie innerhalb der Serien.

Höhere Druckfestigkeiten ergaben sich jeweils für den geringeren w/z -Wert. Ein Vergleich zwischen Hauptserie 1 und 2 sowie den Serien B und C, in denen bei sonst gleicher Mischung die w/z -Werte $= 0,5$ und $0,6$ untersucht wurden, zeigt für die Mischungen mit $w/z = 0,5$ um etwa 12 % bis 26 % höhere Druckfestigkeiten.

Den Einfluß der Schleuderdauer auf die Druckfestigkeit verdeutlicht Tabelle 5.3, in der die Verhältniswerte von β_{CH} nach 20 min. zu β_{CH} nach 10 min. zusammengestellt sind. Nach einer Schleuderdauer von 20 min. ist für Drehzahlen $n = 300, 400$ und 500 U/min. im Mittel eine höhere Druckfestigkeit

als nach 10 min. Schleuderdauer erreicht. Der Festigkeitszuwachs wird mit steigender Drehzahl allerdings geringer. Die Mittelwerte aus allen Drehzahlen lassen zwischen den einzelnen Serien keine signifikanten Unterschiede erkennen.

| Serie | | 1. Hs. | 2. Hs. | A | Serie B | | Serie C | | D |
|-------------------------|------|---------------------------------------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|
| w/z | | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,6 |
| Ausbreitmaß | | ~ 35 | 50-56 | 41-43 | 40-44 | ~ 61 | 28-33 | 45-49 | ~ 46 |
| Drehzahl [U/min.] | min. | mittlere Druckfestigkeit β_{CH} | | | | | | | |
| 300 | 10 | 63,78 | 54,25 | 60,4 | 60,43 | 54,15 | 64,85 | 57,3 | 55,7 |
| | 20 | 70,58 | 58,08 | 67,05 | 68,73 | 64,55 | 69,43 | 65,28 | 61,43 |
| 400 | 10 | 63,25 | 58,55 | 60,73 | 69,1 | - | 60,73 | 62,08 | - |
| | 20 | 70,08 | 59,6 | 65,4 | 73,25 | - | 77,5 | 60,05 | - |
| 500 | 10 | 67,88 | 52,33 | 60,33 | 73,93 | 52,48 | 65,78 | 60,03 | 57,58 |
| | 20 | 68,58 | 59,28 | 60,13 | 72,58 | 49,95 | 74,03 | 63,83 | 56,38 |
| $\beta_{CH}, w/z = 0,5$ | | 1,18 | | - | 1,26 | | 1,12 | | - |
| $\beta_{CH}, w/z = 0,6$ | | | | | | | | | |

Tab. 5.2: Zusammenstellung der mittleren Druckfestigkeiten aus den Versuchsserien und der Druckfestigkeitssteigerung bei $w/z = 0,5$ gegenüber $w/z = 0,6$

| Drehzahl [U/min.] | β_{CH} , 20 min. | | | | | | | | Mittel je V |
|----------------------|------------------------|--------|---------|---------|------|---------|------|---------|----------------|
| | β_{CH} , 10 min. | | | | | | | | |
| | 1. Hs. | 2. Hs. | Serie A | Serie B | | Serie C | | Serie D | |
| | | | | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | | |
| 300 | 1,11 | 1,07 | 1,11 | 1,14 | 1,19 | 1,07 | 1,14 | 1,10 | 1,12 |
| 400 | 1,11 | 1,02 | 1,08 | 1,06 | - | 1,28 | 0,97 | - | 1,09 |
| 500 | 1,01 | 1,13 | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 1,13 | 1,06 | 0,98 | 1,09 |
| Mittel je Serie | 1,08 | 1,07 | 1,06 | 1,06 | 1,07 | 1,16 | 1,06 | 1,04 | |

Tab. 5.3: Einfluß einer Schleuderdauer von 20 min. gegenüber 10 min. auf die Druckfestigkeit

Der Einfluß eines veränderten Zementgehaltes ist aus Tabelle 5.2 nicht abzuleiten. Da die Veränderung des Zementgehaltes bei Vorgabe fester w/z-Werte das Ausbreitmaß erheblich beeinflusst, wird die Festigkeit auch vom Ausbreitmaß entscheidend bestimmt.

Bei einem Vergleich der Serie C, für deren Versuchskörper PZ 55 F verwendet wurde, mit den Hauptserien 1 und 2 ist das veränderte Ausbreitmaß ebenfalls zu berücksichtigen. Trotzdem ist aus diesen Betrachtungen die erwartete Tendenz erkennbar, daß die Verwendung einer höheren Zementgüte auch die Betonfestigkeit erhöht.

5.3.2 Biegezugfestigkeit in Ringrichtung (siehe auch Anlage 1, Bl. 11)

Mit dem Schleuderverfahren sind, vergleichbar zur Druckfestigkeit, auch hohe Betonzugfestigkeiten zu erreichen. Für die Wertung der in dieser Forschungsarbeit gemessenen Biegezugfestigkeiten ist zu berücksichtigen, daß hier ungünstige Randbedingungen bestanden. Vor allem hat das Ausschalen zu einem vergleichsweise frühen Zeitpunkt unter Herausschieben des Betonzylinders aus dem konischen Stahlrohr auch bei vorsichtiger Handhabung sicherlich zu einer oberflächennahen Gefügestörung geführt. Darüberhinaus ist beim Vergleich zu Festigkeitswerten, die an Betonprismen oder Biegebalken ermittelt wurden, zu beachten, daß der Anteil der Bereiche mit hohen Zug-

spannungen bei den geprüften Halbringen vergleichsweise größer ist. Damit nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, daß ein schwächerer Querschnittsbereich mit einer größeren Zugspannung zusammentrifft. Für die hier beabsichtigte vergleichende Parameterbetrachtung entsteht daraus jedoch keine Einschränkung der Aussagekraft.

Eine Zusammenstellung der mittleren Biegezugfestigkeiten enthält Tabelle 5.4. Das Verhältnis der maximalen zur minimalen mittleren Biegezugspannung verdeutlicht, daß auch innerhalb der Serien erhebliche Streubreiten auftreten. Der Einfluß des w/z-Wertes auf die Biegezugfestigkeit ist geringer als auf die Druckfestigkeit. Für w/z = 0,5 wurden im Mittel jedoch deutlich höhere Werte als für w/z = 0,6 ermittelt.

| Serie | $\beta_{BZH, 20 \text{ min}}$ | | | | | | | | |
|----------|-------------------------------|--------------|----------------|-----------------------|------|-----------------------|------|---------|----------|
| | $\beta_{BZH, 10 \text{ min}}$ | | | | | | | | |
| | 1. HS 0,5 | 2. HS 0,6 | Serie A 0,6 | Serie B 0,5 0,6 | | Serie C 0,5 0,6 | | Serie D | Σ |
| V = 300 | 0,78 | 0,98 | 1,28 | 1,15 | 0,94 | 1,19 | 0,9 | 1,11 | 1,04 |
| V = 400 | 1,09 | 1,11 | 0,97 | 1,18 | - | 0,78 | 1,04 | - | 1,03 |
| V = 500 | 1,14 | 1,04 | 1,05 | 1,03 | 0,88 | 1,26 | 0,99 | 1,12 | 1,06 |
| Σ | 1,003 | 1,04 | 1,1 | 1,12 | 0,91 | 1,08 | 0,98 | 1,12 | |

Tab. 5.4: Einfluß einer Schleuderdauer von 20 min. gegenüber 10 min. auf die Biegezugfestigkeit

Auch eine längere Schleuderdauer erhöht die Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ,H}$. Die Erhöhung entspricht etwa den bei der Druckfestigkeit beobachteten Verhältnissen. Tabelle 5.4 verdeutlicht, daß hier ebenfalls eine größere Streubreite möglich ist.

Die Biegezugfestigkeit wird üblicherweise in Abhängigkeit zur 3. Wurzel aus dem Quadrat der Druckfestigkeit dargestellt. Tabelle 5.5 enthält deshalb die hier aus den Festigkeitsuntersuchungen abzuleitenden Verhältnismerte:

$$\beta_{BZ,H} / \sqrt[3]{\beta_{CH}^2}$$

| Serie | | 1. HS | 2. HS | Serie A | Serie B | | Serie C | | Serie D |
|-------|--------|-------|-------|---------|---------|-------|---------|-------|---------|
| | | 0,5 | 0,6 | | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | |
| V=300 | 10 min | 0,428 | 0,433 | 0,277 | 0,262 | 0,354 | 0,281 | 0,289 | 0,289 |
| | 20 min | 0,314 | 0,407 | 0,331 | 0,278 | 0,296 | 0,321 | 0,239 | 0,300 |
| V=400 | 10 min | 0,345 | 0,343 | 0,342 | 0,294 | - | 0,384 | 0,285 | - |
| | 20 min | 0,349 | 0,375 | 0,317 | 0,335 | - | 0,254 | 0,303 | - |
| V=500 | 10 min | 0,362 | 0,397 | 0,331 | 0,321 | 0,380 | 0,236 | 0,329 | 0,306 |
| | 20 min | 0,410 | 0,380 | 0,347 | 0,334 | 0,348 | 0,275 | 0,313 | 0,347 |

Tab. 5.5: Verhältnis der Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ,H}$ zur Druckfestigkeit β_{CH}

Eine Zusammenstellung festgestellter Elastizitätsmodule ist in Anlage 1, Bl. 12, zu finden.

6. Zusammenfassung und Anmerkungen zur Rißbreitenbeschränkung

Die vorliegende Forschungsarbeit beschreibt eine Versuchsserie mit der die Einflüsse der wichtigsten Schleuderparameter für die Herstellung von Schleuderbetonbauteilen untersucht werden. Ausgehend von einer Darstellung des bestehenden Kenntnisstandes sowie einer Auswertung und Beurteilung der in jüngerer Zeit vorwiegend an Schleuderbetonmasten aufgetretenen Schäden wird ein umfassendes Versuchsprogramm konzipiert. Außer einer Variation der Schleuderdrehzahlen und der Schleuderdauern werden bei den Betonrezepturen w/z-Wert, Zementgehalt und Zementgüte variiert.

Um die Versuche gezielt steuern zu können und vergleichbare Randbedingungen zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit eine eigene Schleudermaschine gebaut, die dem Typ der heute am meisten verbreiteten Rollenbank entsprach. Damit wurden zylindrische Abschnitte hergestellt, deren Durchmesser ~ 18 cm und deren Länge 17 cm betrug.

Die erhärteten Abschnitte wurden in jeweils vier Halbschalen zersägt, nachdem die geometrischen Größen innerer Hohlraumdurchmesser, Dicke der Feinanteilschicht und Gesamtwanddicke gemessen worden waren. An den zylindrischen Halbschalen wurden dann Druckfestigkeits- und Biegezugfestigkeitswerte bestimmt.

Wie erwartet wurden auch in diesen Schleuderbetonversuchen vergleichsweise sehr hohe Festigkeiten erreicht. Im mittleren Bereich der hier untersuchten Schleuderparameter zeigte sich bei Veränderungen der Schleuderdauer und -geschwindigkeit nur eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Entmischungen und Festigkeitsänderungen. Erst bei w/z-Werten über 0,5, niedrigen Drehzahlen $v < 300$ U/min. oder Schleuderdauern $t < 10$ min. wurden nachteilige Auswirkungen auf das Betongefüge und die Festigkeiten beobachtet.

Die hier vorgelegten Versuchsergebnisse erlauben die Abschätzung des Einflusses unplanmäßiger Abweichungen beim Schleudervorgang. Sie geben darüberhinaus Hinweise auf wichtige Materialeigenschaften, die bei erweiterten Anwendungen und Einsätzen von Schleuderbetonbauteilen interessieren. Wesentlich ist, u.a. die Beobachtung, dass w/z-Werte $> 0,5$ nicht zu befriedigenden Ergebnissen führen; eine Reduktion des Zementgehaltes auf Werte unter 400 kg/m^3 ist demgegenüber vertretbar, solange $w/z \leq 0,5$ eingehalten wird. Diese Bedingung ist im übrigen auch für die Dauerhaftigkeit der Schleuderbetonbauteile von Bedeutung, weil w/z-Werte $\leq 0,5$ die Karbonatisierungstiefe begrenzen und die Widerstandsfähigkeit gegenüber schädigenden Angriffen aus der Atmosphäre deutlich erhöhen. Zusätzlich sollte der Einsatz von Beschichtungen - innen und außen - überlegt werden.

Abschließend werden noch einige Anmerkungen zur Häufigkeit von Rißschäden und zur Rißbreitenbeschränkung angefügt. Sie sind vor allem auch im Hinblick auf eine Vermeidung neuerlicher Schadensfälle von Bedeutung.

Die hier vorgelegte Schadensanalyse an Schleuderbetonmasten (Bild 2.2) darf als repräsentativ für alle Schleuderbetonerzeugnisse angesehen werden. Sie zeigt, daß die weit überwiegende Mehrzahl der Schäden ($\approx 60 \%$) durch Rißbildungen hervorgerufen wurden, wobei Risse an Formtrennähten und sonstige Längsrisse weit häufiger auftreten als Querrisse ($\sim 34 \%$). Letztere bilden nur bei Stahlbeton-Rohrmasten einen fühlbaren Schadensanteil. Risse an Formtrennähten wurden bei Spannbetonrohren in deutlich geringerer Zahl

festgestellt als "sonstige" Längsrisse, diese aber etwa gleich häufig bei Stahlbeton- wie Spannbetonausführungen (60 - 65 %).

Aus diesen Beobachtungen an Masten, meist hergestellt in den Jahren 1960 - 1970, ist zu schließen:

- Mängel der Schleuderformen (Trennnähte) führen zu einer Vielzahl von Rißschäden. Ursachen hierfür könnten in einem lokal begrenzten Austritt von Zementleim oder in örtlichen Querschnittsdefekten bzw. sprungartigen Änderungen der Wanddicke zu suchen sein. Bedeutsam ist der Umstand, daß bei Spannbetonausführungen diese Schadensform deutlich zurücktritt; möglicherweise sind die hierbei verwendeten Schalungen noch in besserem Zustand als die für Stahlbetonausführungen - häufiger - verwendeten Schalungen.
- Das Auftreten "sonstiger" Längsrisse in gleicher Häufigkeit bei Stahlbeton- wie Spannbetonrohren läßt auf gleiche Ursachen schließen, die unabhängig von den Auswirkungen der Verspannung auftreten. Hier ist vorzugsweise auf Zwangwirkungen zu verweisen, wobei Feuchtigkeit im Rohrrinneren und Quellen der feinteilreichen Innenwandzone sowie Temperaturänderungen hauptsächlich beteiligt sein dürften. Eine Entlüftung des Rohrrinneren in Verbindung mit einer dauernd wirksamen Entwässerung am Mastfuß sollte obligatorisch sein. Ebenso wichtig erscheint der Einbau einer ausreichend für Zwangwirkungen dimensionierten Querbewehrung, um zu große Rißbreiten und Korrosionsschäden zu verhindern.

Gesondert zu beurteilen sind Rißbildungen im Bereich von Rohrstößen, die meist unter Verwendung von Stahl-Einbauteilen ausgeführt werden. Stahlhülsen oder dgl., die als Koppелеlemente im Rohrrinneren angeordnet werden, behindern das Schwinden des Betons und führen hierdurch zu Rißbildungen.

- Querrisse stammen i.d.R. aus Biegebeanspruchungen; dies wird durch den Umstand erhärtet, daß Querrisse fast nur bei Stahlbetonmasten beobachtet wurden. Eine sorgfältig dimensionierte Längsbewehrung wird die Rißbreiten hinreichend begrenzen, sodaß Korrosionsschäden vermieden werden.

- Von Korrosionsschäden als Folge von zu breiten Rissen abgesehen führen Längsrisse zu deutlichen Minderungen der Torsionssteifigkeit und können solcherart Traglastminderungen bewirken; auch auf grund dieser Feststellungen ist eine nicht zu schwache Querbewehrung (Wendelbewehrung) und eine kräftige Wanddicke zu fordern. (Vgl. auch Bild 2.3 und ergänzende Ausführungen).

Die Rißbildung, besonders die Rißbreite bei bewehrten Betonbauteilen, hängt von zahlreichen Einflüssen ab. Besonders hervorzuheben sind:

- Betonzugfestigkeit
- Verbundwirkung
- Bewehrungsgrad
- Betondeckung
- Bauteildicke und Bauteilform
- Zugspannungsverteilung
- Zwangwirkungen aus Feuchte im Rohrinneeren und Temperaturänderungen

Die vorliegenden Schadensanalysen zeigen, daß auch bei Schleuderbetonbauteilen meist Zwangbeanspruchungen als Rißursache anzusehen sind, wenn die Betonzugspannungen die Biegezugfestigkeit überschreiten oder in der Bewehrung infolge Zwang sogar die Streckgrenze erreicht wird und klaffende Risse auftreten. Neben der Einhaltung von Konstruktionsregeln, die z.B. den Stababstand und -durchmesser begrenzen und unter anderem in DIN 1045 und Heft 400 des DAfStb angegeben sind, ist der Einbau einer ausreichenden Mindestbewehrung in Längs- und Querrichtung zur Vermeidung klaffender Risse unbedingt erforderlich.

Aufgabe der Mindestbewehrung ist es, bei Überschreitung der Betonbruchdehnung unter Zugbeanspruchung die freiwerdenden Rißschnittgrößen aufzunehmen. Dabei sollten Rißbreiten von $w = 0,4 \text{ mm}$ bei Stahlbeton- und von $w = 0,2 \text{ mm}$ bei Spannbetonbauteilen nicht überschritten werden; die Stahlspannung sollte bei Rißbildung unterhalb der Streckgrenze bleiben.

Die Bestimmung der Mindestbewehrung kann zum Beispiel nach Gl. 18 in DIN 1045 erfolgen. Dabei wird vorausgesetzt, daß die freiwerdende Betonzugkraft von der Bewehrung aufgenommen wird. Entscheidenden Einfluß auf die Menge der Mindestbewehrung hat die wirksame Betonzugfestigkeit. Hierzu können Hinweise auf die anzusetzende Größenordnung von β_{BZ} bei Schleuderbetonbauteilen den Ergebnissen der Festigkeitsuntersuchungen dieser Forschungsarbeit entnommen werden. Eine Nachweismöglichkeit ist dann mit den Gleichungen (29) und (32) in Heft 400 des DAfStb gegeben.

Bei Beachtung dieser Regeln ist es möglich, dauerhafte und gebrauchsfähige Schleuderbetonbauteile für unterschiedliche Anwendungen herzustellen.

7. Literaturverzeichnis

- /1/ Bacsa, E.:
Schleuderbeton, Herstellung und Verwendung im Hoch- und Tiefbau,
Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 7, 1981

- /2/ Brandt, E.; Fiß, H.-J.:
Analyse und Ursachen von Betonmastschäden, Elektrizitätswirtschaft,
Jg.85, 1986, Heft 8, S. 312-315

- /3/ Bürklin, G.A.; Giese, H.:
110-kV-Kompakt-Doppelleitung auf Betonmasten mit Isoliertraversen,
Elektrizitätswirtschaft, Jg.76, 1977, Heft 2, S. 32-35

- /4/ Bujard, W.:
Rohre aus Stahlbeton und Beton, Tiefbau, 14.Jg., Heft 1, Januar 1972

- /5/ Conrad, K.-H.; Pohlmann, H.; Schuhmann, H.:
Sanierungsverfahren für schadhafte Betonmaste, Elektrizitätswirt-
schaft, Jg.85, 1986, Heft 3, S. 89-94

- /6/ Eigenstetter, E.:
Betonmaste im 110-kV-Leitungsbau, Elektrizitätswirtschaft, Jg.75,
1976, Heft 26, S. 1004-1005

- /7/ Görrissen, I.; Giese, W.; Thierauf, G.:
Betonmaste - Einfluß von Betonmastschäden auf die Standsicherheit und
Lebensdauer, Elektrizitätswirtschaft, Jg.85, 1986, Heft 8, S. 316-323

- /8/ Gossenaerts, F.:
Neuzeitliche Schleuderbetonanlagen, Betonstein-Zeitung, Heft 12,
1960, S. 578-581

- /9/ Giese, W.; Müller, H.:
Erfassung von Schäden an Betonmasten und deren statistische Auswer-
tung, Elektrizitätswirtschaft, Jg.85, 1986, Heft 3, S. 81-88

- /10/ Haarmann, F.:
Bekannte Verfahren zur Herstellung von Beton- und Stahlbetonrohren,
Betonstein-Zeitung, Heft 12, 1971, S. 765-770
- /11/ Haitz, G.:
Umbau einer 20-kV-Betonmast-Doppelleitung zu einer 4-fach-Leitung,
Elektrizitätswirtschaft, Jg.71, 1972, Heft 22, S. 644-645
- /12/ Kleinlogel,:
Eisenbeton - Druckrohre als Schleuderbeton- und als Schleuderbeton-
Vorspannrohre, Beton und Eisen, 37.Jg., 20.5.1938, Heft 10, S. 22-24
- /13/ Knobloch, H.:
Betontragsmaste für Mittelspannungsleitungen ohne feste Fundamente mit
Drehtraversen, Elektrizitätswirtschaft, 1960, Heft 3, S. 67-69
- /14/ Körner, M.:
Das Verhalten vorgespannter Betonmasten bei Seilbruch, Elektrizitäts-
wirtschaft, 1961, Heft 15, S. 550-555
- /15/ Körner, M.:
Schwungsbeanspruchungen an vorgespannten Betonmasten, Elektrizitäts-
wirtschaft, Jg.62, 1963, Heft 15, S. 357-363
- /16/ Krömer, R.:
Fertigung geschleuderter, vorgespannter und schlaffbewehrter Masten,
Türme und Stützen im Betonwerk Pfeleiderer, Betonwerk + Fertigteil-
technik 54, 1988, Heft 9, S. 102-106
- /17/ Lenz, D.:
Stahlbetonrohre und Stahlbetondruckrohre nach der neuen DIN 4035,
Ausgabe September 1976, Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 9, 1976,
S. 450-456
Beton + Fertigteil - Jahrbuch 1977, S. 13-35
- /18/ Lenz, D.:
Schleuderbeton-Vorspannrohre, Betonstein-Zeitung, Heft 11, 1958, S.
411-417

- /19/ Lenz, D.; Möller, H.:
Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonleitungen, Betonkalender 1967, Teil II, S. 474-519
- /20/ Märtens, R.
Schleuderform zur Herstellung von mit mehreren Höhlungen versehenen Hohlkörpern, Patentschrift Deutsches Reich, Nr. 547328, Klasse 80a, Gruppe 56, 22. Januar 1927
- /21/ Mall, G.:
Der Einfluß der Zementbeschaffenheit auf die Herstellung von Schleuderbeton, Betonstein-Zeitung, Heft 8, 1961, S. 403-407
Gaede, K.:
Stellungnahme zum Aufsatz von G. Mall:
Betonstein-Zeitung, Heft 4, 1962, S. 208
- /22/ Marquardt, E.:
Geschleuderte Beton- und Eisenbetonrohre, Die Bautechnik, 8.Jg., Heft 40, September 1930, S. 587-603
- /23/ Mayer, R.:
Die Herstellung großer Eisenbetonrohre nach dem Schleuderverfahren, Patent Vianini für die Druckrohrleitung der Mittleren Joar AG bei Unterföhring, Beton und Eisen, Heft 13, 1928, S. 242-247
- /24/ Meyer-Ottens, K.:
Bericht: Schadensfälle an Schleuderbetonrohren, 4. April 1961
- /25/ Niepelt, H.:
Die verschiedenen Verfahren zur Herstellung von Betonrohren, Betonstein-Zeitung, Heft 4, 1965, S. 179-185
- /26/ N.N.
Schleuderbetonmasten, Baumarkt, Leipzig, 31. Jg., 1932
- /27/ N.N.
Herstellung von Wasserleitungsrohren mittels des Zentrifugalgußverfahrens, Das Betonwerk, 22.Jg., Nr. 6, 10. Februar 1934

- /28/ N.N.
Ortsbewegliche Anlage zum Herstellen von Schleuderbetonrohren, Beton-
stein-Zeitung, Heft 20, 1941, S. 234
- /29/ Nolze, H.:
Das Schleuderverfahren und der Mittelbetrieb, Betonwerk, 8. März 1931
- /30/ Obenauer, K.:
Der Einfluß der Fliehkraft auf die Textur des Schleuderbetons
- /31/ Radakovits, M.:
Sanierung von bewehrten Schleuderbeton-Hochspannungsmasten Instand-
setzung und Erhaltung von Bauten aus Beton und Stahlbeton, Int. Fach-
tagung Innsbruck-Igls, Januar 1988, Österreichischer Betonverein, In-
stitut für Baustofflehre und Materialprüfung, Universität Innsbruck,
S. 189-195
- /32/ Rieger, H.:
Freileitungsmaste aus Stahlrohren mit Schleuderbeton VDE-Fachbe-
richte, ETZ A 1954, 1954, 18, Heft 21, 725 ff (ETZ)
- /33/ Ros, M.:
Eisenbeton-Schleuderrohre Bauart Vianini, Schweizerische Bauzeitung,
Band 93, Nr. 25, 22. Juni 1929, S. 303-308
- /34/ Rostan, W.:
Herstellen von Schleuderbetonmasten, Vortragsveranstaltung zum Thema
"Betonmaste unter Witterungsbeanspruchung" in Darmstadt am 19.9.1984,
Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V.
- /35/ Schießl, P.:
Einwirkungen auf die Bewehrung, Vortragsveranstaltung zum Thema "Be-
tonmaste unter Witterungsbeanspruchung" in Darmstadt am 19.9.1984,
Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V.

- /36/ Suter, R.; Dal Busco, S.:
Colonnes Centrifugées Gram Séries expérimentales A et B; Versuchsbericht des Institut de Statique et Structures Béton armé et pré-contraint, Département de Génie Civil, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- /37/ Trinkaus, H.:
Die Oberleitung Re 250 für die Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn, Eisenbahningenieur 37 (1986) 10, S. 441-451
- /38/ Wagner, C.:
Ursachen von Längsrissen in Betonmasten und daraus abzuleitende Produktionsmaßnahmen, Elektrizitätswirtschaft, Jg.85, 1986, Heft 3, S. 95-97
- /39/ Weber, J.:
Bestimmung der Karbonatisierungstiefe an bestehenden Betonmasten im Raum Rheinfelden, unveröffentlichter Bericht der EMPA Nr. 50'885, 5. Dezember 1984
- /40/ Weidler, G.:
Der genormte Betonmast, Elektrizitätswirtschaft, Jg.63, 1964, Heft 25, S. 922-926
- /41/ Weigler, H.:
Widerstand des Betons und Korrosionsschutz der Bewehrung, Vortragsveranstaltung zum Thema "Betonmaste unter Witterungsbeanspruchung" in Darmstadt am 19.9.1984, Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V.
- /42/ Wierig, H.-J.:
Einwirkungen auf Beton, Vortragsveranstaltung zum Thema "Betonmaste unter Witterungsbeanspruchung" in Darmstadt am 19.9.1984, Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V.
- /43/ Zollinger, R.:
Beitrag zur Ermittlung der für zweckmäßiges Schleudern maßgebenden Faktoren, Betonstein-Zeitung, 25. Oktober 1941, S. 235-283

- /44/ DAFStb Richtlinien für die Bemessung und Ausführung von Stahlbeton - Masten, Berlin-Köln-Frankfurt, Beuth Verlag GmbH, 1974
- /45/ Handbuch für Rohre aus Beton, Stahlbeton, Spannbeton, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V. Bonn
- /46/ SACAC Schleuderbetonwerk
Firmenprospekt mit Konstruktionsunterlagen und Bemessungstabellen für Schleuderbetonstützen; Stand 1987
- /47/ LGA Bayern
Stahlrohrmaste mit Schleuderbeton, Unver. Untersuchungsbericht, 1954
- /48/ LGA Bayern
Güteüberwachung an Schleuderbetonmasten, Unver. Untersuchungsbericht, 1954
- /49/ Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Unveröffentlichter Untersuchungsbericht Nr. 556/3527 - HB/Schr vom 10.8.1987; Prüfung von drei in Schleudertechnik hergestellten Stahlbetonstützen auf Brandwiderstand nach DIN 4102 Teil 2, Ausgabe 1977
- /50/ Vorträge auf der VDZ - Tagung 1988 in Düsseldorf
Neck, U.: Auswirkungen der Wärmebehandlung auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton
Sylla, H.M.: Reaktion im Zementstein bei der Wärmebehandlung

| 1) | 2) | n | t | w/z | Festigkeit | | | 3) ϕ_i | 3) d_{MiD} | | | Aus | T | Zem.- geh. |
|------------------|------------------|-------|------|-----|---------------------|-----------------------|-----------|----------------|-----------------|-------|-------------|------|----|---------------|
| | | | | | Zug β_{BZ} | Druck β_{CH} | β_W | | B | MiD | Fein B D | | | |
| | | U/min | min | | | N/mm ² | | mm | | | mm | cm | °C | kg |
| O U O U | 1 1 2 2 | 200 | 7.0 | 0.5 | 7.04 | 45.6 | 57.0 | 58 | 63 | 64 | 1.5 1.5 | 35 | 22 | 400 |
| | | | 7.0 | | 6.80 | 48.1 | | 60 | 65 | 67 | 1.5 2.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 7.23 | 49.1 | | 58 | 61 | 63 | 2.5 1.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 7.58 | 50.0 | | 70 | 58 | 59 | 2.0 1.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 10.0 | | 6.26 | 45.8 | 57.0 | 62 | 60 | 61 | 0.0 0.0 | 36 | 20 | |
| | | | 10.0 | | 7.66 | 56.0 | | -- | 64 | 66 | 0.0 0.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 7.18 | 47.0 | | 62 | 63 | 62 | 1.5 1.5 | | | |
| | | | 10.0 | | 6.91 | 48.9 | | 62 | 63 | 63 | 2.0 1.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 15.0 | | 7.28 | 43.7 | 57.0 | 91 | 54 | 46 | 0.0 0.0 | 37 | 18 | |
| | | | 15.0 | | 0.00 | 56.4 | | -- | 74 | 64 | 0.0 0.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 6.06 | 43.7 | | 58 | 61 | 49 | 0.0 0.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 8.33 | 52.6 | | 87 | 54 | 52 | 0.0 0.0 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 20.0 | | | 48.0 | 52.0 | -- | 45 | 45 | 0.0 0.0 | 37.5 | 19 | |
| | | | 20.0 | | 7.12 | 56.5 | | 87 | 44 | 45 | 0.0 0.0 | | | |
| | | | 20.0 | | 7.97 | 48.7 | | 92 | 52 | 50 | 0.0 0.0 | | | |
| | | | 20.0 | | -- | -- | | -- | -- | -- | 0.0 0.0 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | 200 | 20.0 | 0.5 | | | 53.0 | | | | | 37 | 20 | 400 |
| | | | 20.0 | | | | | | | | | | | |
| | | | 20.0 | | | | | | | | | | | |
| | | | 20.0 | | | | | | | | | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | 300 | 7.0 | 0.5 | 6.18 | 56.9 | 57.0 | 80 | 54 | 56 | 3.5 6.0 | 35 | 21 | 400 |
| | | | 7.0 | | 5.97 | 59.5 | | 62 | 57 | 55 | 5.5 5.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 6.02 | 52.4 | | 80 | 62 | 59 | 3.0 6.0 | | | |
| | | | 7.0 | | 6.35 | 51.7 | | 57 | 64 | 64 | 4.5 6.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 10.0 | | 6.79 | 61.9 | 56.0 | 79 | 54 | 54 | 3.5 4.5 | 35 | 21 | |
| | | | 10.0 | | 7.44 | 63.0 | | -- | 56 | 57 | 4.0 5.5 | | | |
| | | | 10.0 | | 5.59 | 66.9 | | 78 | 53 | 53 | 7.0 6.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 7.53 | 63.3 | | -- | 55 | 56 | 6.5 6.0 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 15.0 | | 4.44 | 60.2 | 56.0 | 72 | 60 | 61 | 7.0 7.0 | 35 | 21 | |
| | | | 15.0 | | 5.14 | 57.5 | | -- | 59 | 58 | 7.5 7.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 5.10 | 52.6 | | 64 | 61 | 62 | 4.5 4.5 | | | |
| | | | 15.0 | | 4.69 | 53.0 | | 66 | 62 | 62 | 5.0 6.0 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 20.0 | | 4.69 | 74.5 | 58.0 | 81 | 49 | 49 | 7.0 7.5 | 35 | 20 | |
| | | | 20.0 | | 6.64 | 63.2 | | -- | 50 | 52 | 7.0 7.5 | | | |
| | | | 20.0 | | 5.52 | 75.1 | | 83 | 49 | 50 | 7.5 10.0 | | | |
| | | | 20.0 | | 4.57 | 69.5 | | 78 | 51 | 53 | 8.0 8.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | 300 | 20.0 | 0.5 | | | 55.0 | | | | | 37 | 20 | 400 |
| | | | 20.0 | | | | | | | | | | | |
| | | | 20.0 | | | | | | | | | | | |
| | | | 20.0 | | | | | | | | | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | 400 | 7.0 | 0.5 | 6.03 | 67.9 | 55.0 | 73 | 55 | 56 | 5.5 5.5 | 35 | 21 | 400 |
| | | | 7.0 | | 4.99 | 62.8 | | 66 | 57 | 58 | 6.5 8.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 5.42 | 62.3 | | 71 | 58 | 57 | 5.5 4.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 5.11 | 61.9 | | 67 | 59 | 57 | 4.5 4.0 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 10.0 | | 5.28 | 66.3 | 55.0 | 69 | 57 | 57 | 6.0 5.5 | -- | -- | |
| | | | 10.0 | | 4.90 | 51.9 | | 66 | 58 | 59 | 4.5 5.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 6.27 | 65.7 | | 74 | 55 | 55 | 5.5 4.5 | | | |
| | | | 10.0 | | 5.43 | 69.1 | | 67 | 58 | 57 | 4.0 4.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 15.0 | | 5.13 | 75.0 | 57.0 | 71 | 56 | 55 | 4.0 4.5 | 38 | 18 | |
| | | | 15.0 | | 5.69 | 59.3 | | 67 | 56 | 56 | 5.5 2.5 | | | |
| | | | 15.0 | | 6.27 | 75.8 | | 73 | 55 | 55 | 2.5 3.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 5.05 | 72.0 | | 70 | 57 | 57 | 3.0 3.0 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 20.0 | | 6.03 | 67.3 | 57.0 | 70 | 55 | 56 | 3.5 4.0 | 36 | 19 | |
| | | | 20.0 | | 5.14 | 69.3 | | 68 | 56 | 57 | -- -- | | | |
| | | | 20.0 | | 6.08 | 66.5 | | 71 | 56 | 55 | 1.5 1.0 | | | |
| | | | 20.0 | | 6.52 | 77.2 | | 69 | 55 | 55 | 1.5 1.0 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | 400 | 20.0 | 0.5 | | | 55.0 | | | | | 37 | 19 | 400 |
| | | | 20.0 | | | | | | | | | | | |
| | | | 20.0 | | | | | | | | | | | |
| | | | 20.0 | | | | | | | | | | | |

Bild 1: Ergebnisse der begleitenden Messungen und der Festigkeitsuntersuchungen in der 1. Hauptserie

| 1) | 2) | n | t | w/z | Festigkeit | | | 3) ϕ_i | 3) d_{MiD} | | | 3) Fein B D | Aus | T | Zem.- geh. |
|----|----|-------|------|-----|---------------------|-----------------------|-----------|----------------|-----------------|----|-----|-------------------|-----|----|---------------|
| | | | | | Zug β_{BZ} | Druck β_{CH} | β_W | | B | M | D | | | | |
| | | U/min | min | | N/mm ² | | | mm | mm | | | mm | cm | °C | kg |
| O | 1 | 500 | 7.0 | 0.5 | 6.88 | 55.9 | 57.0 | 69 | 59 | 57 | -- | -- | 35 | 21 | 400 |
| U | 1 | | 7.0 | | 7.23 | 60.9 | | 55 | 62 | 63 | -- | -- | | | |
| O | 2 | | 7.0 | | 5.10 | 61.8 | | 56 | 62 | 59 | -- | -- | | | |
| U | 2 | | 7.0 | | 5.76 | 56.4 | | 62 | 62 | 60 | -- | -- | | | |
| O | 1 | | 10.0 | | 6.13 | 63.6 | 57.0 | 47 | 60 | 60 | -- | -- | 34 | 21 | |
| U | 1 | | 10.0 | | 4.47 | 63.8 | | 56 | 59 | 60 | -- | -- | | | |
| O | 2 | | 10.0 | | 6.35 | 72.2 | | 70 | 55 | 55 | -- | -- | | | |
| U | 2 | | 10.0 | | 7.14 | 71.9 | | 69 | 55 | 56 | -- | -- | | | |
| O | 1 | | 15.0 | | 7.28 | 66.0 | 55.0 | 68 | 56 | 57 | -- | -- | 35 | 21 | |
| U | 1 | | 15.0 | | 6.98 | 63.3 | | 66 | 57 | 56 | -- | -- | | | |
| O | 2 | | 15.0 | | 6.47 | 65.2 | | 68 | 56 | 56 | -- | -- | | | |
| U | 2 | | 15.0 | | 6.62 | 62.8 | | 68 | 56 | 56 | -- | -- | | | |
| O | 1 | | 20.0 | | 6.51 | 71.3 | 58.0 | 71 | 56 | 57 | -- | -- | 37 | 20 | |
| U | 1 | | 20.0 | | 7.79 | 68.7 | | 70 | 56 | 56 | -- | -- | | | |
| O | 2 | | 20.0 | | 5.93 | 66.5 | | 71 | 56 | 56 | -- | -- | | | |
| U | 2 | | 20.0 | | 7.25 | 67.8 | | 69 | 55 | 56 | 1.5 | -- | | | |
| O | 1 | 500 | 7.0 | 0.5 | 4.88 | 55.6 | 57.0 | 57 | 68 | 71 | -- | -- | 34 | 20 | 400 |
| U | 1 | | 7.0 | | 6.59 | 55.9 | | 50 | 66 | 69 | -- | -- | | | |
| O | 2 | | 7.0 | | 8.39 | 57.3 | | 69 | 59 | 60 | 2.5 | 0.5 | | | |
| U | 2 | | 7.0 | | 8.59 | 55.4 | | 71 | 59 | 59 | 2.5 | 1.5 | | | |
| O | 1 | | 10.0 | | 4.79 | 53.3 | 57.0 | 60 | 64 | 63 | -- | -- | 35 | 19 | |
| U | 1 | | 10.0 | | 5.32 | 54.5 | | 67 | 62 | 64 | -- | -- | | | |
| O | 2 | | 10.0 | | 7.37 | 69.4 | | 70 | 57 | 57 | 1.5 | 2.0 | | | |
| U | 2 | | 10.0 | | 7.13 | 65.2 | | 67 | 58 | 58 | 2.0 | 2.0 | | | |
| O | 1 | | 15.0 | | 8.63 | 57.8 | 60.0 | 67 | 58 | 58 | 2.0 | 2.5 | 35 | 21 | |
| U | 1 | | 15.0 | | 8.36 | 51.6 | | 76 | 59 | 57 | 2.0 | 2.5 | | | |
| O | 2 | | 15.0 | | 7.56 | 64.7 | | 71 | 56 | 56 | 2.0 | 1.5 | | | |
| U | 2 | | 15.0 | | 7.53 | 62.1 | | 71 | 57 | 57 | 1.5 | 2.0 | | | |
| O | 1 | | 20.0 | | 7.39 | 68.9 | 56.0 | 68 | 58 | 60 | 2.5 | 2.5 | 53 | 19 | |
| U | 1 | | 20.0 | | 6.80 | 65.6 | | 70 | 60 | 60 | 3.0 | 3.0 | | | |
| O | 2 | | 20.0 | | 7.33 | 68.7 | | 70 | 57 | 57 | 2.5 | 2.5 | | | |
| U | 2 | | 20.0 | | 7.18 | 66.3 | | 73 | 58 | 57 | 2.0 | 2.5 | | | |

Bild 2: Ergebnisse der begleitenden Messungen und der Festigkeitsuntersuchungen in der 1. Hauptserie

| 1) | 2) | n | t | w/z | Festigkeit | | | 3) ϕ_i | 3) d_{MiD} | | 3) Fein | | Aus | T | Zem.- geh. |
|-----|----|-------|------|-----|---------------------|-----------------------|-----------|----------------|-----------------|----|------------|------|-----|----|---------------|
| | | | | | Zug β_{BZ} | Druck β_{CH} | β_W | | B | D | B | D | | | |
| | | U/min | min | | N/mm ² | | | mm | mm | | mm | | cm | °C | kg |
| O 1 | 1 | 300 | 7.0 | 0.6 | 5.60 | 51.9 | 45.0 | 88 | 48 | 46 | 5.0 | 6.5 | 53 | 19 | 400 |
| U 1 | 1 | | 7.0 | | 5.34 | 50.7 | | 84 | 49 | 50 | 5.5 | 4.5 | | | |
| O 2 | 2 | | 7.0 | | 5.39 | 56.7 | | 88 | 48 | 48 | 5.0 | 6.5 | | | |
| U 2 | 2 | | 7.0 | | 5.61 | 55.2 | | 87 | 49 | 49 | 5.0 | 6.0 | | | |
| O 1 | 1 | | 10.0 | | 6.62 | 51.0 | 49.0 | 84 | 49 | 48 | 11.0 | 9.5 | 54 | 21 | |
| U 1 | 1 | | 10.0 | | 5.41 | 51.7 | | 84 | 51 | 52 | 12.0 | 9.5 | | | |
| O 2 | 2 | | 10.0 | | 6.53 | 56.0 | | 84 | 50 | 50 | 11.5 | 12.5 | | | |
| U 2 | 2 | | 10.0 | | 6.29 | 58.3 | | 83 | 51 | 51 | 11.0 | 10.5 | | | |
| O 1 | 1 | | 15.0 | | 5.10 | 49.3 | 52.0 | 82 | 50 | 51 | 11.5 | 10.5 | 53 | 21 | |
| U 1 | 1 | | 15.0 | | 4.66 | 49.0 | | 76 | 52 | 52 | 12.0 | 9.0 | | | |
| O 2 | 2 | | 15.0 | | 5.38 | 58.6 | | 84 | 50 | 50 | 8.0 | 8.5 | | | |
| U 2 | 2 | | 15.0 | | 5.30 | 57.9 | | 77 | 50 | 49 | 8.5 | 9.0 | | | |
| O 1 | 1 | | 20.0 | | 6.30 | 58.5 | 47.0 | 88 | 48 | 48 | 9.0 | 8.0 | 56 | 19 | |
| U 1 | 1 | | 20.0 | | 6.52 | 59.2 | | 81 | 49 | 49 | 7.5 | 8.5 | | | |
| O 2 | 2 | | 20.0 | | 6.04 | 59.6 | | 85 | 50 | 50 | 7.5 | 7.5 | | | |
| U 2 | 2 | | 20.0 | | 5.57 | 55.0 | | 80 | 51 | 51 | 8.5 | 9.5 | | | |
| O 1 | 1 | 400 | 7.0 | 0.6 | 5.03 | 43.0 | 43.0 | 77 | 55 | 55 | 4.5 | 5.5 | 56 | 19 | 400 |
| U 1 | 1 | | 7.0 | | 4.90 | 44.5 | | 72 | 56 | 56 | 4.0 | 6.0 | | | |
| O 2 | 2 | | 7.0 | | 5.24 | 46.7 | | 74 | 56 | 56 | 6.5 | 7.0 | | | |
| U 2 | 2 | | 7.0 | | 5.18 | 48.1 | | 75 | 57 | 57 | 7.0 | 7.0 | | | |
| O 1 | 1 | | 10.0 | | 4.89 | 60.5 | 49.0 | 76 | 54 | 54 | 9.0 | 10.5 | 53 | 21 | |
| U 1 | 1 | | 10.0 | | 5.06 | 57.1 | | 69 | 55 | 55 | 11.5 | 11.0 | | | |
| O 2 | 2 | | 10.0 | | 5.35 | 59.0 | | 76 | 55 | 55 | 9.0 | 8.5 | | | |
| U 2 | 2 | | 10.0 | | 5.38 | 57.6 | | 72 | 56 | 57 | 9.0 | 9.5 | | | |
| O 1 | 1 | | 15.0 | | 5.78 | 60.4 | 44.0 | 76 | 55 | 55 | 10.0 | 9.0 | 52 | 20 | |
| U 1 | 1 | | 15.0 | | 5.76 | 57.5 | | 71 | 56 | 56 | 9.5 | 10.0 | | | |
| O 2 | 2 | | 15.0 | | 5.74 | 57.9 | | 80 | 53 | 53 | 9.0 | 8.5 | | | |
| U 2 | 2 | | 15.0 | | 5.70 | 58.4 | | 74 | 55 | 55 | 9.0 | 9.5 | | | |
| O 1 | 1 | | 20.0 | | 5.51 | 54.4 | 48.0 | 73 | 55 | 55 | 10.5 | 9.5 | 53 | 20 | |
| U 1 | 1 | | 20.0 | | 4.95 | 56.0 | | 68 | 58 | 57 | 10.0 | 9.5 | | | |
| O 2 | 2 | | 20.0 | | 6.08 | 62.1 | | 78 | 53 | 53 | 8.5 | 8.0 | | | |
| U 2 | 2 | | 20.0 | | 6.34 | 65.9 | | 73 | 53 | 53 | 8.0 | 9.5 | | | |

Bild 3: Ergebnisse der begleitenden Messungen und der Festigkeitsuntersuchungen der 2. Hauptserie

| 1) | 2) | n | t | w/z | Festigkeit | | | 3) ϕ_i | 3) d_{MiD} | 3) Fein B D | Aus | T | Zem.- geh. | | |
|------------------|------------------|-------|------|-----|--------------|--------------|-----------|----------------|-----------------|-------------------|-----|-----|---------------|----------|-----|
| | | | | | Zug | Druck | β_W | | | | | | | | |
| | | | | | β_{BZ} | β_{HZ} | | | | | | | | N/mm^2 | |
| | | U/min | min | | | | | mm | mm | mm | cm | °C | kg | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | 500 | 7.0 | 0.6 | 5.19 | 57.7 | 46.0 | 77 | 57 | 57 | 8.0 | 9.0 | 53 | 19 | 400 |
| | | | 7.0 | | 4.69 | 57.7 | | 69 | 61 | 61 | 9.0 | 9.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 5.93 | 55.6 | | 77 | 56 | 57 | 8.5 | 7.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 6.05 | 56.3 | | 67 | 58 | 59 | 8.5 | 8.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 10.0 | | 5.92 | 54.6 | 44.0 | 75 | 57 | 57 | 4.5 | 5.5 | 53 | 19 | |
| | | | 10.0 | | 5.18 | 52.8 | | 70 | 59 | 58 | 4.5 | 6.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 0.00 | 52.9 | | 78 | 56 | 57 | 5.0 | 6.5 | | | |
| | | | 10.0 | | 0.00 | 49.0 | | 69 | 60 | 60 | 6.0 | 5.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 15.0 | | 5.71 | 54.6 | 45.0 | 76 | 57 | 56 | 6.0 | 5.0 | 51 | 17 | |
| | | | 15.0 | | 5.78 | 52.5 | | 70 | 57 | 57 | 5.5 | 5.5 | | | |
| | | | 15.0 | | 5.90 | 52.9 | | 75 | 56 | 56 | 6.0 | 5.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 6.25 | 51.7 | | 69 | 56 | 56 | 5.5 | 4.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 20.0 | | 5.79 | 57.6 | 51.0 | 76 | 56 | 55 | 5.5 | 6.0 | 54 | 19 | |
| | | | 20.0 | | 5.52 | 52.4 | | 70 | 58 | 57 | 4.5 | 5.5 | | | |
| | | | 20.0 | | 6.36 | 65.0 | | 77 | 56 | 56 | 5.0 | 5.5 | | | |
| | | | 20.0 | | 5.39 | 62.1 | | 61 | 59 | 59 | 5.0 | 6.0 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | 500 | 7.0 | 0.6 | 6.73 | 59.3 | 54.0 | 72 | 56 | 56 | 4.0 | 4.0 | 46 | 18 | 400 |
| | | | 7.0 | | 6.36 | 59.5 | | 68 | 57 | 56 | 3.5 | 5.0 | | | |
| | | | 7.0 | | 6.24 | 58.9 | | 74 | 56 | 56 | 5.0 | 5.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 6.10 | 56.3 | | 69 | 57 | 57 | 4.5 | 4.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 10.0 | | 5.19 | 57.8 | 49.0 | 75 | 56 | 55 | 5.5 | 6.5 | 52 | 19 | |
| | | | 10.0 | | 4.98 | 55.3 | | 71 | 57 | 56 | 5.5 | 6.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 5.35 | 54.9 | | 75 | 57 | 57 | 7.5 | 7.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 5.49 | 51.6 | | 67 | 58 | 58 | 8.5 | 8.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 15.0 | | 5.37 | 57.6 | 49.0 | 76 | 57 | 57 | 8.0 | 8.5 | 52 | 20 | |
| | | | 15.0 | | 5.33 | 53.8 | | 69 | 60 | 60 | 8.5 | 8.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 5.38 | 57.0 | | 71 | 56 | 56 | 7.5 | 7.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 5.23 | 54.9 | | 71 | 58 | 57 | 7.0 | 6.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 20.0 | | 5.09 | 59.8 | 49.0 | 75 | 56 | 56 | 7.5 | 6.0 | 52 | 20 | |
| | | | 20.0 | | 5.01 | 55.7 | | 72 | 57 | 57 | 7.0 | 7.0 | | | |
| | | | 20.0 | | 5.46 | 57.0 | | 75 | 55 | 56 | 7.0 | 7.5 | | | |
| | | | 20.0 | | 5.32 | 56.3 | | 71 | 57 | 57 | 6.5 | 7.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | 550 | 7.0 | 0.6 | 6.73 | 59.3 | 54.0 | 72 | 56 | 56 | 4.0 | 4.0 | 46 | 18 | 400 |
| | | | 7.0 | | 6.36 | 59.5 | | 68 | 57 | 56 | 3.5 | 5.0 | | | |
| | | | 7.0 | | 6.24 | 58.9 | | 74 | 56 | 56 | 5.0 | 5.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 6.10 | 56.3 | | 69 | 57 | 57 | 4.5 | 4.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 10.0 | | 5.19 | 57.8 | 49.0 | 75 | 56 | 55 | 5.5 | 6.5 | 52 | 19 | |
| | | | 10.0 | | 4.98 | 55.3 | | 71 | 57 | 56 | 5.5 | 6.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 5.35 | 54.9 | | 75 | 57 | 57 | 7.5 | 7.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 5.49 | 51.6 | | 67 | 58 | 58 | 8.5 | 8.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 15.0 | | 5.37 | 57.6 | 49.0 | 76 | 57 | 57 | 8.0 | 8.5 | 52 | 20 | |
| | | | 15.0 | | 5.33 | 53.8 | | 69 | 60 | 60 | 8.5 | 8.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 5.38 | 57.0 | | 71 | 56 | 56 | 7.5 | 7.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 5.23 | 54.9 | | 71 | 58 | 57 | 7.0 | 6.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 20.0 | | 5.09 | 59.8 | 49.0 | 75 | 56 | 56 | 7.5 | 6.0 | 52 | 20 | |
| | | | 20.0 | | 5.01 | 55.7 | | 72 | 57 | 57 | 7.0 | 7.0 | | | |
| | | | 20.0 | | 5.46 | 57.0 | | 75 | 55 | 56 | 7.0 | 7.5 | | | |
| | | | 20.0 | | 5.32 | 56.3 | | 71 | 57 | 57 | 6.5 | 7.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | 550 | 7.0 | 0.6 | 6.73 | 59.3 | 54.0 | 72 | 56 | 56 | 4.0 | 4.0 | 46 | 18 | 400 |
| | | | 7.0 | | 6.36 | 59.5 | | 68 | 57 | 56 | 3.5 | 5.0 | | | |
| | | | 7.0 | | 6.24 | 58.9 | | 74 | 56 | 56 | 5.0 | 5.5 | | | |
| | | | 7.0 | | 6.10 | 56.3 | | 69 | 57 | 57 | 4.5 | 4.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 10.0 | | 5.19 | 57.8 | 49.0 | 75 | 56 | 55 | 5.5 | 6.5 | 52 | 19 | |
| | | | 10.0 | | 4.98 | 55.3 | | 71 | 57 | 56 | 5.5 | 6.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 5.35 | 54.9 | | 75 | 57 | 57 | 7.5 | 7.0 | | | |
| | | | 10.0 | | 5.49 | 51.6 | | 67 | 58 | 58 | 8.5 | 8.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 15.0 | | 5.37 | 57.6 | 49.0 | 76 | 57 | 57 | 8.0 | 8.5 | 52 | 20 | |
| | | | 15.0 | | 5.33 | 53.8 | | 69 | 60 | 60 | 8.5 | 8.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 5.38 | 57.0 | | 71 | 56 | 56 | 7.5 | 7.0 | | | |
| | | | 15.0 | | 5.23 | 54.9 | | 71 | 58 | 57 | 7.0 | 6.5 | | | |
| O U O U | 1 1 2 2 | | 20.0 | | 5.09 | 59.8 | 49.0 | 75 | 56 | 56 | 7.5 | 6.0 | 52 | 20 | |
| | | | 20.0 | | 5.01 | 55.7 | | 72 | 57 | 57 | 7.0 | 7.0 | | | |
| | | | 20.0 | | 5.46 | 57.0 | | 75 | 55 | 56 | 7.0 | 7.5 | | | |
| | | | 20.0 | | 5.32 | 56.3 | | 71 | 57 | 57 | 6.5 | 7.5 | | | |

| 1) | 2) | n | t | w/z | Festigkeit | | | 3) ϕ_i | 3) d_{MID} | | 3) Fein | | Aus | T | Zem.- geh. |
|----|----|-------|------|-----|---------------------|--|-----------|----------------|-----------------|----|------------|-----|-----|----|---------------|
| | | | | | Zug β_{BZ} | Druck β_{CH_2} N/mm ² | β_W | | B | D | B | D | | | |
| | | U/min | min | | | | | mm | mm | mm | mm | mm | cm | °C | kg |
| O | 1A | 300 | 10.0 | 0.6 | 4.46 | 56.7 | 54.0 | 83 | 50 | 50 | 5.0 | 6.0 | 41 | 18 | 350 |
| U | 1A | | 10.0 | | 4.11 | 60.9 | | 83 | 51 | 51 | 6.0 | 7.0 | | | |
| O | 2A | | 10.0 | | 4.33 | 61.9 | 53.0 | 84 | 49 | 50 | 7.0 | 7.5 | 42 | 18 | |
| U | 2A | | 10.0 | | 4.18 | 62.1 | | 86 | 51 | 50 | 7.5 | 7.5 | | | |
| O | 1A | | 20.0 | | 4.93 | 65.9 | 48.0 | 84 | 51 | 50 | 8.0 | 7.5 | 42 | 20 | |
| U | 1A | | 20.0 | | 5.60 | 66.2 | | 83 | 51 | 51 | 7.0 | 8.5 | | | |
| O | 2A | | 20.0 | | 5.61 | 67.3 | 50.0 | 85 | 50 | 50 | 8.0 | 8.0 | 42 | 20 | |
| U | 2A | 300 | 20.0 | 0.6 | 5.70 | 68.8 | | 81 | 51 | 51 | 7.5 | 8.0 | | | 350 |
| O | 1A | 400 | 10.0 | 0.6 | 5.34 | 64.0 | 48.0 | 76 | 54 | 54 | 7.5 | 8.0 | 42 | 20 | 350 |
| U | 1A | | 10.0 | | 5.17 | 62.3 | | 74 | 56 | 56 | 8.5 | 8.0 | | | |
| O | 2A | | 10.0 | | 5.35 | 58.6 | 45.0 | 75 | 52 | 53 | 8.5 | 8.0 | 42 | 18 | |
| U | 2A | | 10.0 | | 5.29 | 58.0 | | 74 | 55 | 55 | 8.0 | 8.0 | | | |
| O | 1A | | 20.0 | | 5.21 | 66.8 | 52.0 | 75 | 54 | 54 | 7.5 | 8.0 | 43 | 21 | |
| U | 1A | | 20.0 | | 4.81 | 66.1 | | 74 | 55 | 55 | 8.5 | 8.0 | | | |
| O | 2A | | 20.0 | | 5.16 | 64.2 | 51.0 | 75 | 54 | 54 | 7.5 | 7.0 | 43 | 20 | |
| U | 2A | 400 | 20.0 | 0.6 | 5.37 | 64.5 | | 74 | 55 | 55 | 7.5 | 8.0 | | | 350 |
| O | 1A | 500 | 10.0 | 0.6 | 5.33 | 60.3 | 50.0 | 73 | 54 | 53 | 4.5 | 5.0 | 42 | 22 | 350 |
| U | 1A | | 10.0 | | 4.94 | 57.7 | | 75 | 55 | 55 | 4.5 | 5.0 | | | |
| O | 2A | | 10.0 | | 5.02 | 61.5 | 50.0 | 74 | 55 | 56 | 5.5 | 6.0 | 42 | 20 | |
| U | 2A | | 10.0 | | 5.09 | 61.8 | | 73 | 56 | 56 | 6.0 | 6.0 | | | |
| O | 1A | | 20.0 | | 5.60 | 62.0 | 51.0 | 74 | 55 | 56 | 6.0 | 6.0 | 42 | 21 | |
| U | 1A | | 20.0 | | 4.98 | 61.0 | | 71 | 57 | 56 | 5.5 | 6.0 | | | |
| O | 2A | | 20.0 | | 5.25 | 59.7 | 48.0 | 75 | 56 | 56 | 6.0 | 6.5 | 43 | 20 | |
| U | 2A | 500 | 20.0 | 0.6 | 5.43 | 57.8 | | 74 | 56 | 56 | 6.5 | 6.5 | | | 350 |

Bild 5: Ergebnisse der begleitenden Messungen und der Festigkeitsuntersuchungen in der Serie A

| 1) | 2) | n | t | w/z | Festigkeit | | | 3) ϕ_i | 3) d_{MiD} | | | 3) Fein B D | Aus | T | Zem.- geh. | |
|----|----|-------|------|-----|--------------|-------------------------------------|-----------|----------------|-----------------|-------|------|-------------------|-----|------|---------------|---|
| | | | | | Zug | Druck | β_W | | B | MiD | B | | | | | D |
| | | | | | β_{BZ} | β_{CH_2} N/mm ² | | | | | | | | | | |
| | | U/min | min | | | | | mm | mm | mm | cm | °C | kg | | | |
| O | 1B | 300 | 10.0 | 0.5 | 3.65 | 56.6 | 54.0 | 79 | 54 | 56 | 19.0 | 20.0 | 43 | 23 | 450 | |
| U | 1B | | 10.0 | | 3.66 | 61.7 | | 80 | 56 | 55 | 18.5 | 19.0 | | | | |
| O | 2B | | 10.0 | | 3.43 | 60.9 | | 84 | 52 | 51 | 17.5 | 22.0 | 43 | 21 | | |
| U | 2B | | 10.0 | | 5.42 | 62.5 | 55.0 | 68 | 53 | 54 | 19.5 | 19.5 | | | | |
| O | 1B | | 20.0 | | 3.91 | 66.0 | | 80 | 52 | 51 | 15.0 | 17.0 | 40 | 21 | | |
| U | 1B | | 20.0 | | 4.96 | 68.1 | 57.0 | 85 | 50 | 51 | 12.0 | 13.5 | | | | |
| O | 2B | | 20.0 | | 4.75 | 71.6 | | 87 | 50 | 51 | 12.0 | 14.0 | 42 | 20.5 | 450 | |
| U | 2B | 300 | 20.0 | 0.5 | 5.02 | 69.2 | 56.0 | 82 | 51 | 51 | 13.5 | 15.5 | | | | |
| O | 1B | 400 | 10.0 | 0.5 | 4.77 | 67.9 | | 81 | 52 | 52 | 9.0 | 9.5 | 43 | 21 | 450 | |
| U | 1B | | 10.0 | | 4.43 | 69.3 | 62.0 | 71 | 55 | 55 | 8.5 | 10.5 | | | | |
| O | 2B | | 10.0 | | 5.46 | 72.2 | | 81 | 52 | 52 | 10.5 | 10.5 | 43 | 19 | | |
| U | 2B | | 10.0 | | 5.12 | 67.0 | 57.0 | 79 | 54 | 55 | 11.0 | 10.0 | | | | |
| O | 1B | | 20.0 | | 5.67 | 71.8 | | 76 | 55 | 55 | 12.0 | 11.5 | 42 | 20 | | |
| U | 1B | | 20.0 | | 5.73 | 72.4 | 58.0 | 75 | 55 | 55 | 11.5 | 11.0 | | | | |
| O | 2B | | 20.0 | | 5.97 | 76.4 | | 76 | 54 | 54 | 12.5 | 13.0 | 44 | 18 | 450 | |
| U | 2B | 400 | 20.0 | 0.5 | 6.07 | 72.4 | 57.0 | 75 | 54 | 55 | 13.0 | 12.0 | | | | |
| O | 1B | 500 | 10.0 | 0.5 | 5.72 | 72.8 | | 74 | 55 | 55 | 8.0 | 9.0 | 40 | 21 | 450 | |
| U | 1B | | 10.0 | | 5.56 | 73.6 | 62.0 | 73 | 56 | 56 | 9.0 | 9.0 | | | | |
| O | 2B | | 10.0 | | 5.70 | 75.5 | | 75 | 55 | 55 | 10.0 | 9.0 | 43 | 18 | | |
| U | 2B | | 10.0 | | 5.64 | 73.8 | 58.0 | 72 | 56 | 56 | 9.5 | 9.5 | | | | |
| O | 1B | | 20.0 | | 6.37 | 75.7 | | 74 | 54 | 55 | 11.0 | 10.5 | 43 | 20 | | |
| U | 1B | | 20.0 | | 5.77 | 72.9 | 63.0 | 74 | 56 | 56 | 11.0 | 11.0 | | | | |
| O | 2B | | 20.0 | | 5.53 | 71.1 | | 75 | 55 | 55 | 10.5 | 10.0 | 45 | 18 | 450 | |
| U | 2B | 500 | 20.0 | 0.5 | 5.57 | 70.6 | 59.0 | 73 | 55 | 55 | 11.0 | 10.5 | | | | |
| O | 1B | 300 | 10.0 | 0.6 | 4.62 | 54.2 | | 86 | 49 | 48 | 7.0 | 9.5 | 61 | 20 | 450 | |
| U | 1B | | 10.0 | | 4.66 | 53.8 | 48.0 | 85 | 50 | 50 | 8.0 | 8.5 | | | | |
| O | 2B | | 10.0 | | 5.90 | 55.0 | | 87 | 49 | 50 | 11.0 | 11.5 | 63 | 17 | | |
| U | 2B | | 10.0 | | 5.05 | 53.6 | 48.0 | 82 | 53 | 52 | 10.5 | 11.0 | | | | |
| O | 1B | | 20.0 | | 5.08 | 68.4 | | 89 | 46 | 46 | 9.0 | 10.0 | 61 | 21 | | |
| U | 1B | | 20.0 | | 4.79 | 65.0 | 50.0 | 90 | 46 | 47 | 9.5 | 10.5 | | | | |
| O | 2B | | 20.0 | | 4.52 | 63.0 | | 80 | 51 | 51 | 11.0 | 12.0 | 61 | 17 | 450 | |
| U | 2B | 300 | 20.0 | 0.6 | 4.65 | 61.8 | 49.0 | 78 | 52 | 52 | 10.5 | 13.0 | | | | |
| O | 1B | 500 | 10.0 | 0.6 | 5.47 | 53.4 | | 75 | 57 | 58 | 12.0 | 12.5 | 59 | 20 | 450 | |
| U | 1B | | 10.0 | | 4.94 | 50.1 | 48.0 | 69 | 59 | 60 | 13.0 | 13.0 | | | | |
| O | 2B | | 10.0 | | 5.61 | 54.6 | | 74 | 56 | 56 | 12.5 | 13.5 | 59 | 17 | | |
| U | 2B | | 10.0 | | 5.30 | 51.8 | 51.0 | 70 | 57 | 58 | 13.0 | 13.5 | | | | |
| O | 1B | | 20.0 | | 4.65 | 50.1 | | 73 | 57 | 57 | 12.5 | 13.0 | 63 | 19 | | |
| U | 1B | | 20.0 | | 4.58 | 44.1 | 44.0 | 70 | 58 | 59 | 13.0 | 12.0 | | | | |
| O | 2B | | 20.0 | | 4.82 | 54.5 | | 74 | 58 | 57 | 12.0 | 13.0 | 61 | 16 | 450 | |
| U | 2B | 500 | 20.0 | 0.6 | 4.81 | 51.1 | 49.0 | 68 | 58 | 59 | 12.0 | 13.0 | | | | |

Bild 6: Ergebnisse der begleitenden Messungen und der Festigkeitsuntersuchungen in der Serie B

| 1) | 2) | n | t | w/z | Festigkeit | | | 3) ϕ_i | 3) d_{MiD} | | | 3) Fein B D | Aus | T | Zem.- geh. |
|------------------|----|-----|------|-----|-------------------|--------------|-----------|----------------|-----------------|----|------|-------------------|-----|----|---------------|
| | | | | | Zug | Druck | | | | | | | | | |
| | | | | | β_{BZ} | β_{CH} | β_W | | | | | | | | |
| | | | | | N/mm ² | | | mm | mm | | | mm | cm | °C | kg |
| O U O U | 1C | 300 | 10.0 | 0.5 | 4.85 | 65.8 | 65.0 | 59 | 62 | 61 | 0.5 | 1.5 | 33 | 19 | 400 |
| | 1C | | 10.0 | | 4.80 | 63.2 | | 63 | 61 | 61 | 1.5 | 1.5 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 4.45 | 66.3 | | 62 | 61 | 61 | 1.5 | 1.5 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 4.07 | 64.1 | | 62 | 61 | 61 | 1.5 | 2.5 | | | |
| O U O U | 1C | 300 | 20.0 | 0.5 | 5.43 | 66.4 | 63.0 | 65 | 63 | 63 | -- | -- | 28 | 22 | 400 |
| | 1C | | 20.0 | | 5.52 | 69.0 | | 64 | 63 | 63 | -- | -- | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 5.48 | 73.1 | | 61 | 60 | 60 | -- | -- | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 5.20 | 69.2 | | 61 | 61 | 61 | -- | -- | | | |
| O U O U | 1C | 400 | 10.0 | 0.5 | 6.03 | 76.0 | 67.0 | 59 | 59 | 59 | -- | 1.5 | 31 | 20 | 400 |
| | 1C | | 10.0 | | 5.71 | 70.7 | | 58 | 60 | 60 | 0.5 | 1.5 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 6.19 | 47.8 | | 48 | 66 | 67 | -- | -- | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 5.77 | 48.4 | | 49 | 67 | 68 | -- | -- | | | |
| O U O U | 1C | 400 | 20.0 | 0.5 | 4.93 | 77.6 | 63.0 | 68 | 58 | 58 | 10.5 | 11.0 | 33 | 21 | 400 |
| | 1C | | 20.0 | | 4.70 | 75.5 | | 68 | 58 | 58 | 10.5 | 10.5 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 4.34 | 79.9 | | 64 | 60 | 59 | 8.0 | 10.0 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 4.47 | 77.0 | | 60 | 60 | 60 | 8.5 | 10.0 | | | |
| O U O U | 1C | 500 | 10.0 | 0.5 | 2.80 | 66.7 | 66.0 | 51 | 68 | 70 | -- | -- | 31 | 21 | 400 |
| | 1C | | 10.0 | | 3.14 | 62.1 | | 54 | 68 | 70 | -- | -- | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 4.59 | 68.0 | | 67 | 59 | 59 | 10.5 | 9.5 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 4.87 | 66.3 | | 65 | 59 | 60 | 9.5 | 10.0 | | | |
| O U O U | 1C | 500 | 20.0 | 0.5 | 4.37 | 73.8 | 65.0 | 67 | 59 | 59 | 5.0 | 6.0 | 31 | 22 | 400 |
| | 1C | | 20.0 | | 4.39 | 70.7 | | 65 | 60 | 60 | 5.5 | 5.5 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 5.12 | 75.4 | | 67 | 58 | 58 | 6.5 | 7.0 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 5.53 | 76.2 | | 67 | 58 | 59 | 7.0 | 7.0 | | | |

Bild 7: Ergebnisse der begleitenden Messungen und der Festigkeitsuntersuchungen in der Serie C

| 1) | 2) | n | t | w/z | Festigkeit | | | 3) ϕ_i | 3) d_{MiD} | | 3) Fein | | Aus | T | Zem.- geh. |
|------------------|----|-------|------|-----|---------------------|---------------------------------|------|----------------|-----------------|----|------------|------|-----|----|---------------|
| | | | | | Zug β_{BZ} | Druck β_{CH} β_W | | | B | D | B | D | | | |
| | | | | | | N/mm^2 | | | | | | | | | |
| | | U/min | min | | | | | mm | mm | mm | mm | cm | °C | kg | |
| O U O U | 1C | 300 | 10.0 | 0.6 | 4.12 | 55.2 | 53.0 | 83 | 50 | 50 | 11.0 | 11.5 | 45 | 21 | 400 |
| | 1C | | 10.0 | | 4.38 | 55.2 | | 84 | 51 | 51 | 12.5 | 12.0 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 4.48 | 59.5 | | 91 | 49 | 48 | 11.5 | 11.0 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 4.21 | 59.3 | | 81 | 50 | 50 | 11.0 | 11.5 | | | |
| O U O U | 1C | 300 | 20.0 | 0.6 | 3.80 | 64.9 | 49.0 | 83 | 51 | 51 | 13.0 | 12.5 | 45 | 18 | 400 |
| | 1C | | 20.0 | | 4.00 | 65.2 | | 78 | 50 | 51 | 13.5 | 13.0 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 3.80 | 64.0 | | 85 | 50 | 50 | 13.0 | 12.0 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 3.91 | 67.0 | | 85 | 50 | 50 | 12.5 | 12.0 | | | |
| O U O U | 1C | 400 | 10.0 | 0.6 | 3.70 | 59.2 | 54.0 | 79 | 56 | 55 | 10.5 | 10.5 | 46 | 21 | 400 |
| | 1C | | 10.0 | | 3.76 | 60.3 | | 76 | 56 | 56 | 10.0 | 10.5 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 5.38 | 64.0 | | 79 | 54 | 55 | 11.5 | 11.5 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 5.02 | 64.8 | | 75 | 56 | 56 | 11.5 | 11.5 | | | |
| O U O U | 1C | 400 | 20.0 | 0.6 | 4.71 | 58.6 | 53.0 | 76 | 55 | 55 | 11.0 | 11.5 | 49 | 19 | 400 |
| | 1C | | 20.0 | | 4.93 | 60.0 | | 72 | 55 | 56 | 11.0 | 11.5 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 4.57 | 58.9 | | 76 | 55 | 55 | 12.0 | 12.5 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 4.34 | 62.7 | | 73 | 56 | 56 | 13.0 | 13.0 | | | |
| O U O U | 1C | 500 | 10.0 | 0.6 | 5.08 | 60.9 | 52.0 | 74 | 57 | 58 | 10.5 | 11.5 | 46 | 18 | 400 |
| | 1C | | 10.0 | | 5.29 | 59.4 | | 71 | 57 | 58 | 10.5 | 11.0 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 4.80 | 61.5 | | 71 | 57 | 57 | 11.5 | 11.0 | | | |
| | 2C | | 10.0 | | 5.00 | 58.3 | | 70 | 57 | 57 | 11.0 | 12.0 | | | |
| O U O U | 1C | 500 | 20.0 | 0.6 | 5.18 | 65.9 | 51.0 | 71 | 57 | 57 | 11.0 | 11.5 | 47 | 19 | 400 |
| | 1C | | 20.0 | | 4.99 | 62.9 | | 69 | 59 | 58 | 11.0 | 11.0 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 4.89 | 62.5 | | 71 | 58 | 58 | 11.0 | 12.0 | | | |
| | 2C | | 20.0 | | 4.93 | 64.0 | | 68 | 59 | 59 | 11.0 | 11.5 | | | |

Bild 8: Ergebnisse der begleitenden Messungen und der Festigkeitsunter-
suchungen in der Serie C

| 1) | 2) | n | t | w/z | Festigkeit | | | 3) ϕ_i | 3) d_{MiD} | | 3) Fein B D | Aus cm | T °C | Zem.- geh. kg |
|--|----|-----|------|-----|---------------------|--|-----------|----------------|-----------------|-------|-------------------|-----------|---------|---------------------|
| | | | | | Zug β_{BZ} | Druck β_{CH_2} N/mm ² | β_W | | B | MiD | | | | |
| O U O U | 1D | 300 | 10.0 | 0.6 | 4.27 | 58.2 | 52.0 | 90 | 48 | 47 | 7.0 6.5 | 46 | 22 | 375 |
| | 1D | | 10.0 | | 3.94 | 55.6 | | 86 | 50 | 50 | 6.0 6.0 | | | |
| | 2D | | 10.0 | | 4.31 | 54.3 | 48.0 | 87 | 47 | 48 | 5.0 6.0 | | | |
| | 2D | | 10.0 | | 4.35 | 54.7 | | 87 | 48 | 49 | 5.5 6.5 | | | |
| O U O U | 1D | 300 | 20.0 | 0.6 | 4.77 | 63.0 | 50.0 | 75 | 54 | 54 | 8.5 9.5 | 48 | 20 | 375 |
| | 1D | | 20.0 | | 4.59 | 60.4 | | 75 | 55 | 55 | 9.5 10.5 | | | |
| | 2D | | 20.0 | | 4.77 | 61.5 | 51.0 | 84 | 50 | 51 | 7.5 9.0 | | | |
| | 2D | | 20.0 | | 4.53 | 60.8 | | 83 | 51 | 51 | 8.0 9.0 | | | |
| O U O U O U O U | 1D | 500 | 10.0 | 0.6 | 4.10 | 59.7 | 49.0 | 73 | 57 | 56 | 9.0 10.5 | 48 | 20 | 375 |
| | 1D | | 10.0 | | 4.42 | 56.1 | | 69 | 57 | 57 | 9.0 10.0 | | | |
| | 2D | | 10.0 | | 4.96 | 56.5 | 48.0 | 71 | 59 | 58 | 4.0 6.0 | | | |
| | 2D | | 10.0 | | 4.78 | 58.0 | | 68 | 60 | 59 | 5.5 6.5 | | | |
| | 1D | 500 | 20.0 | 0.6 | 5.05 | 55.1 | 46.0 | 73 | 57 | 57 | 6.0 7.0 | 50 | 19 | 375 |
| | 1D | | 20.0 | | 5.04 | 57.4 | | 68 | 58 | 58 | 7.0 7.5 | | | |
| | 2D | | 20.0 | | 5.16 | 57.2 | 45.0 | 75 | 56 | 56 | 7.5 7.5 | | | |
| | 2D | | 20.0 | | 5.16 | 55.8 | | 70 | 58 | 58 | 8.0 7.5 | | | |

Bild 9: Ergebnisse der begleitenden Messungen und der Festigkeitsuntersuchungen in der Serie D

| Her- steller | Alter Tage | Druckfestigkeit [N/mm ²] | | | Probe |
|-----------------|---------------|--|--|--|---|
| | | radial | tangential | längs | |
| A | 88 | 75,82 76,37 78,10 75,00 <hr/> i.M. 76,32 | 71,03 73,67 71,14 71,60 <hr/> i.M. 71,86 | | Würfel 80 • 80 • 80 mm Rohdichte i.M. 2388 kg/m ³ |
| | | | | | |
| B | 71 | 87,59 86,20 78,95 86,17 <hr/> i.M. 84,73 | 87,61 95,62 86,30 88,50 <hr/> i.M. 89,51 | | Würfel 80 • 80 • 80 mm Rohdichte i.M. 2466 kg/m ³ |
| | 71 | | | 85,98 98,34 93,92 93,11 89,23 86,36 <hr/> i.M. 91,16 | Zylinder, d = 80 mm, H/d = 1,0 Rohdichte i.M. 2498 kg/m ³ |
| C | 70 | 68,50 72,59 71,42 66,41 <hr/> i.M. 69,73 | 68,87 69,00 70,65 71,21 <hr/> i.M. 69,93 | | Würfel 80 • 80 • 80 mm Rohdichte i.M. 2476 kg/m ³ |
| | 70 | 68,33 71,79 70,34 <hr/> i.M. 70,15 * | | 78,26 76,28 75,79 80,49 80,00 79,19 <hr/> 78,02 * 78,65 * | Zylinder, d = 80 mm, H/d = 1,0 Rohdichte i.M. 2468 kg/m ³ 1) an äußerer Quer- schnittsseite ent- nommen 2) an innerer Quer- schnittsseite ent- nommen |
| | | 94,48 91,28 95,96 <hr/> i.M. 93,91 ** | | 85,44 83,13 99,07 82,47 86,44 86,34 <hr/> 90,32 83,98 ** | |

Bild 10: Zusammenstellung der Druckfestigkeiten, die an Proben aus verschiedenen Schleuderbetonwerken ermittelt wurden

□ = t = 10 min

○ = t = 20 min

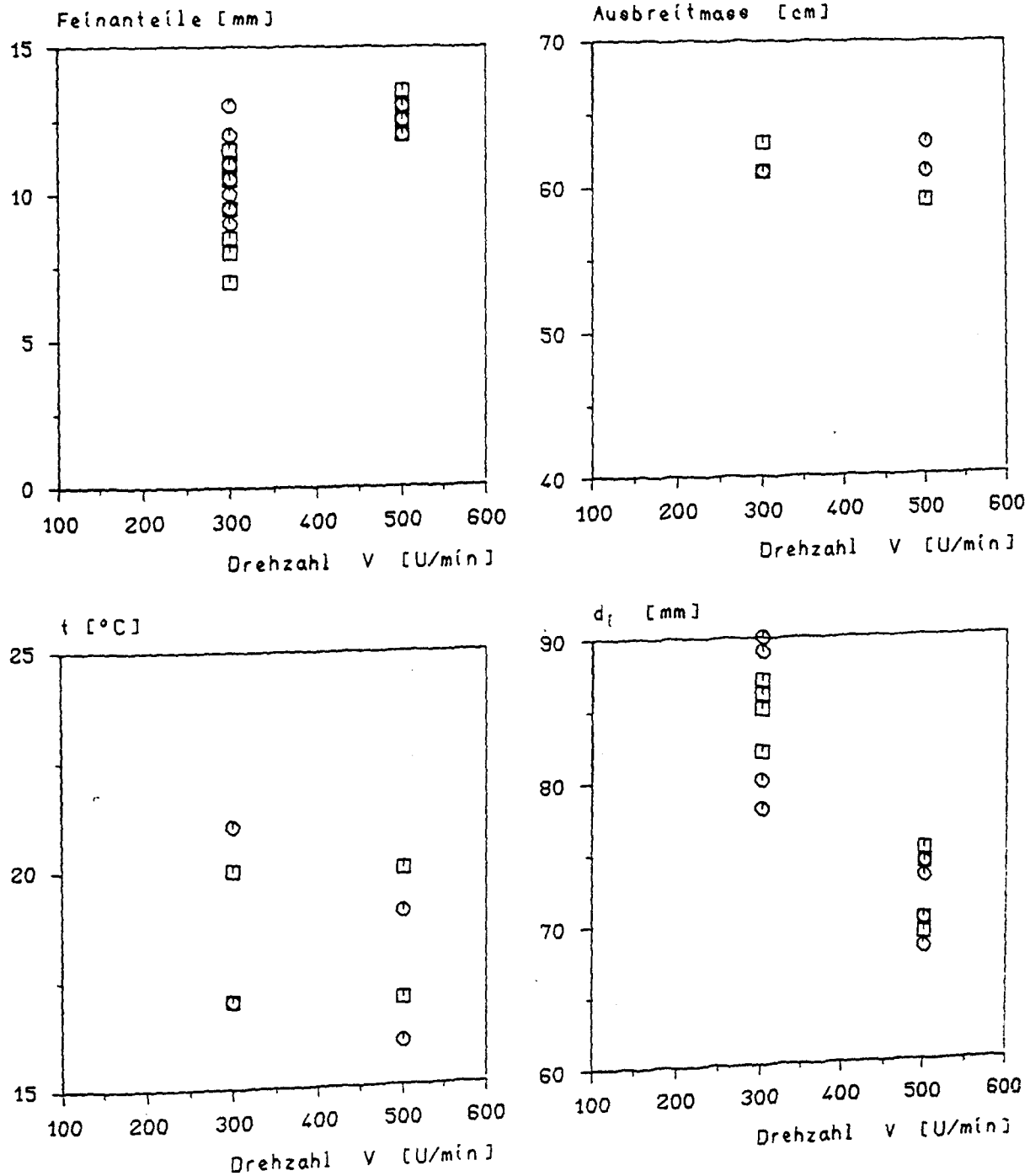


Bild 10: Schleuderbeton Serie B, w/z = 0,6

| Her- steller | E-Modul [N/mm^2] | | Probe |
|-----------------|--|---|--|
| | tangential | längs | |
| A | $31,32 \cdot 10^3$ $30,66 \cdot 10^3$ | $28,12 \cdot 10^3$ $30,56 \cdot 10^3$ | Prisma $\approx 80 \cdot 80 \cdot 160 \text{ mm}$ |
| | i.M. $30,99 \cdot 10^3$ | i.M. $29,34 \cdot 10^3$ | |
| | | | |
| B | $42,21 \cdot 10^3$ $40,92 \cdot 10^3$ | $40,82 \cdot 10^3$ $39,17 \cdot 10^3$ $40,69 \cdot 10^3$ | Prisma $\approx 100 \cdot 100 \cdot 340 \text{ mm}$ |
| | i.M. $41,56 \cdot 10^3$ | i.M. $40,23 \cdot 10^3$ | |
| | $44,35 \cdot 10^3$ $40,06 \cdot 10^3$ | | |
| | i.M. $42,21 \cdot 10^3$ | | |
| | | | |
| | | $38,46 \cdot 10^3$ $40,19 \cdot 10^3$ $38,71 \cdot 10^3$ $37,98 \cdot 10^3$ $36,97 \cdot 10^3$ $38,43 \cdot 10^3$ i.M. $38,46 \cdot 10^3$ | Zylinder $\phi 80 \text{ mm}$, Höhe $h = 160 \text{ mm}$ |
| C | $43,27 \cdot 10^3$ $40,77 \cdot 10^3$ | | Prisma $\approx 80 \cdot 80 \cdot 160 \text{ mm}$ |
| | i.M. $42,02 \cdot 10^3$ | | |

Bild 12: Zusammenstellung der Elastizitätsmodule, die an Proben aus verschiedenen Schleuderbetonwerken ermittelt wurden

Grafische Darstellung der Ergebnisse aus den eigenen Versuchen

Erläuterung:

Auf der geraden Seite sind jeweils die Festigkeiten und die mittlere Wanddicke der geschleuderten Zylinder in Abhängigkeit der Drehzahl angegeben.

Die bei jeder Mischung bestimmte Würfeldruckfestigkeit ist ebenfalls der Drehzahl zugeordnet, um den Vergleich zu den zugehörigen geschleuderten Versuchskörpern zu ermöglichen.

Auf der ungeraden Seite sind die Dicke der Feinanteilschicht sowie der Durchmesser des inneren Hohlraums in Abhängigkeit zur Drehzahl aufgetragen. Um wiederum die Zuordnung zu erleichtern, sind das für jede Mischung bestimmte Ausbreitmaß und die Mischungstemperatur ebenfalls der Drehzahl zugeordnet.

$\square = t = 7 \text{ min}$
 $\circ = t = 10 \text{ min}$
 $\triangle = t = 15 \text{ min}$
 $\times = t = 20 \text{ min}$

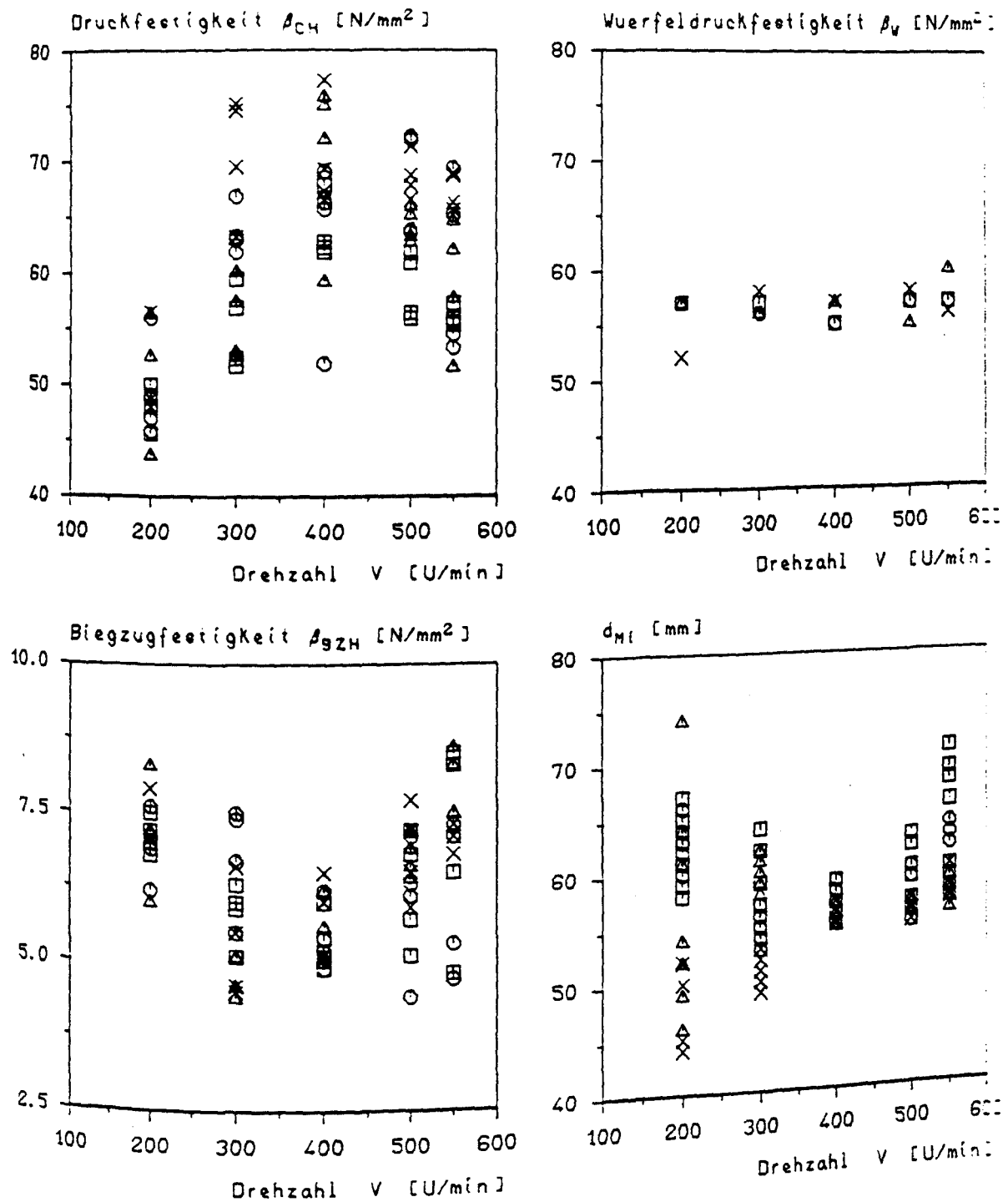
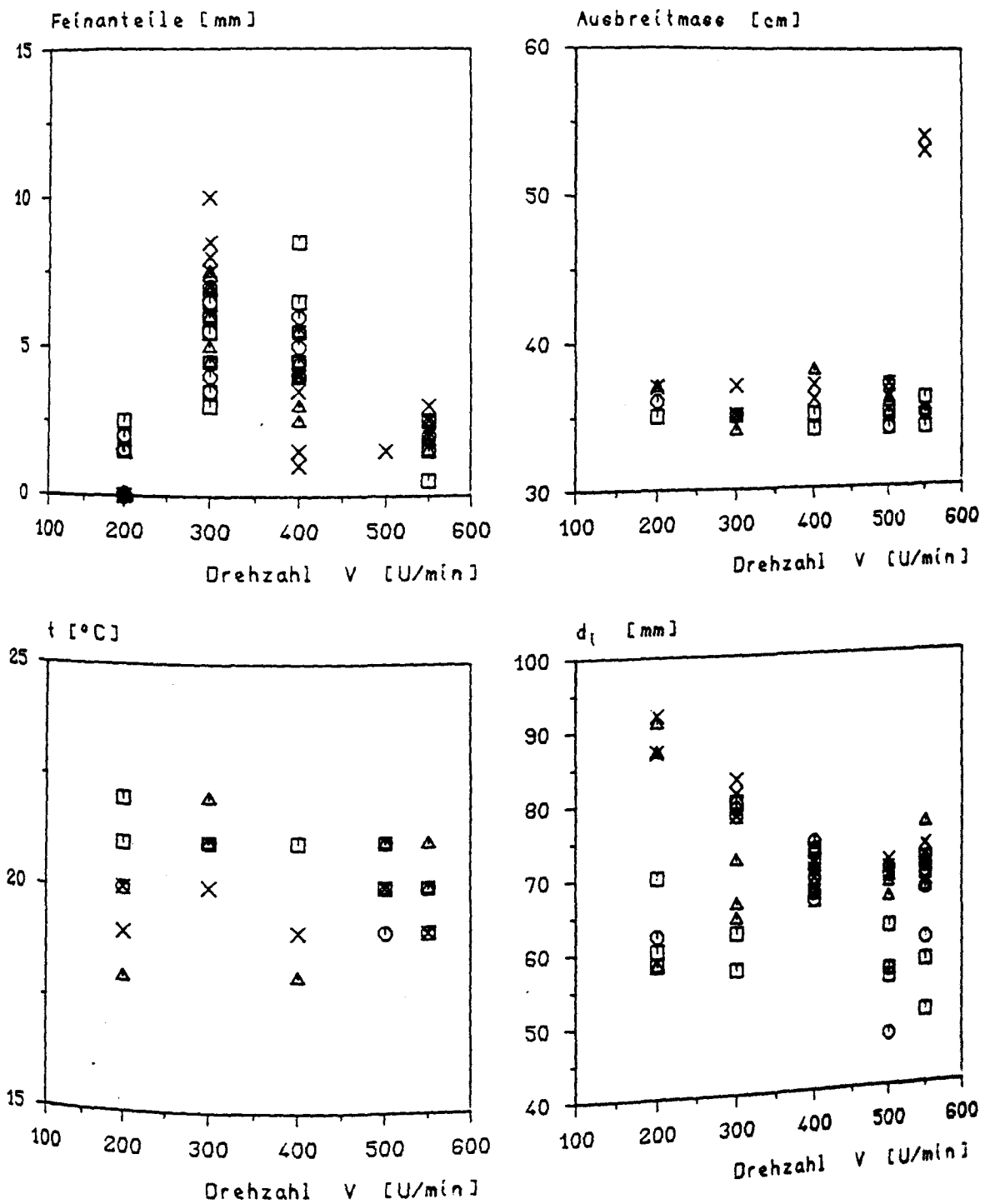


Bild 1: Schleuderbeton Hauptserie 1, $w/z = 0,5$

$\square = t = 7 \text{ min}$
 $\circ = t = 10 \text{ min}$
 $\triangle = t = 15 \text{ min}$
 $\times = t = 20 \text{ min}$



□ = t = 7 min
○ = t = 10 min
△ = t = 15 min
X = t = 20 min

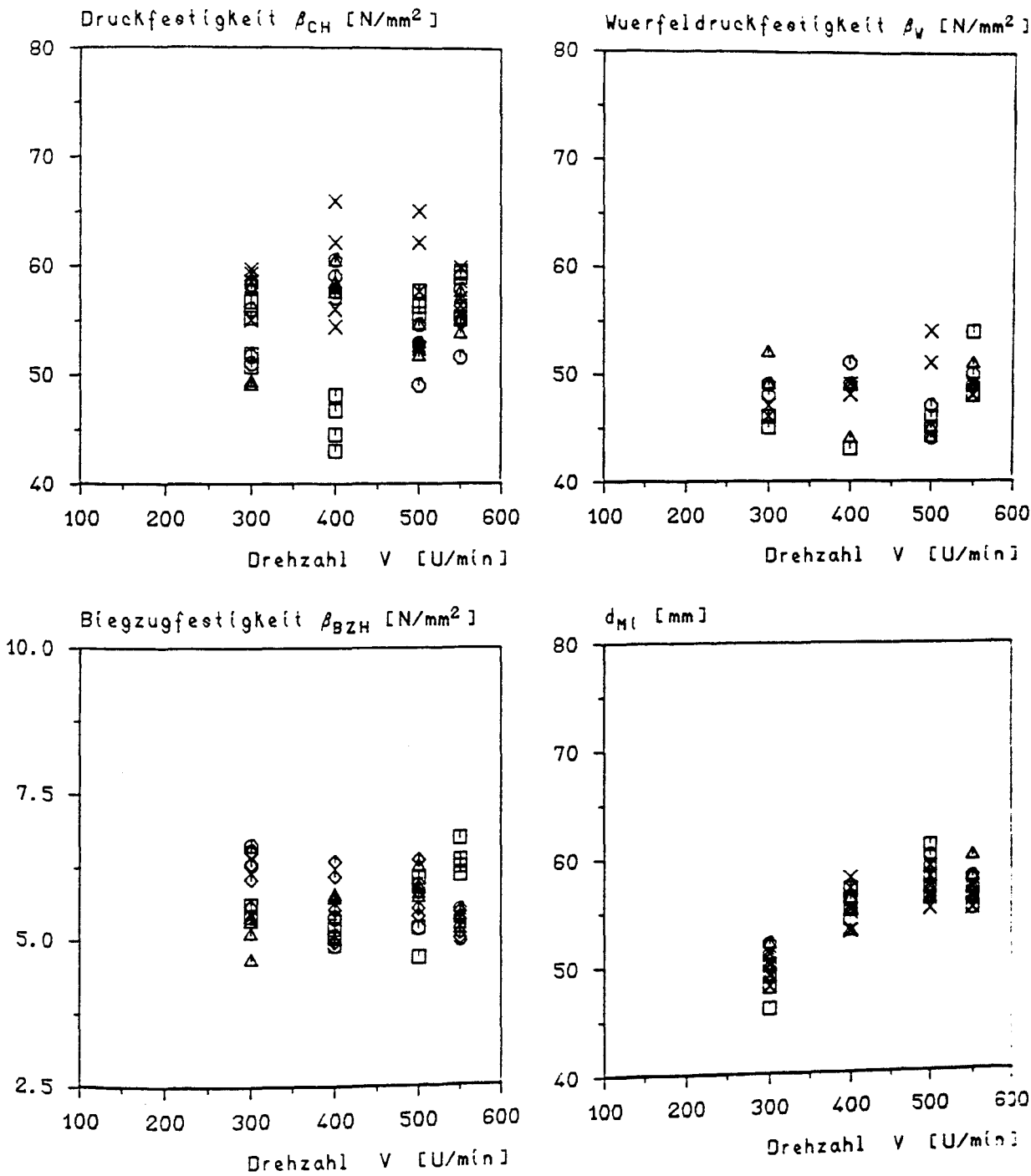


Bild 3: Schleuderbeton Hauptserie 2, w/z = 0,6

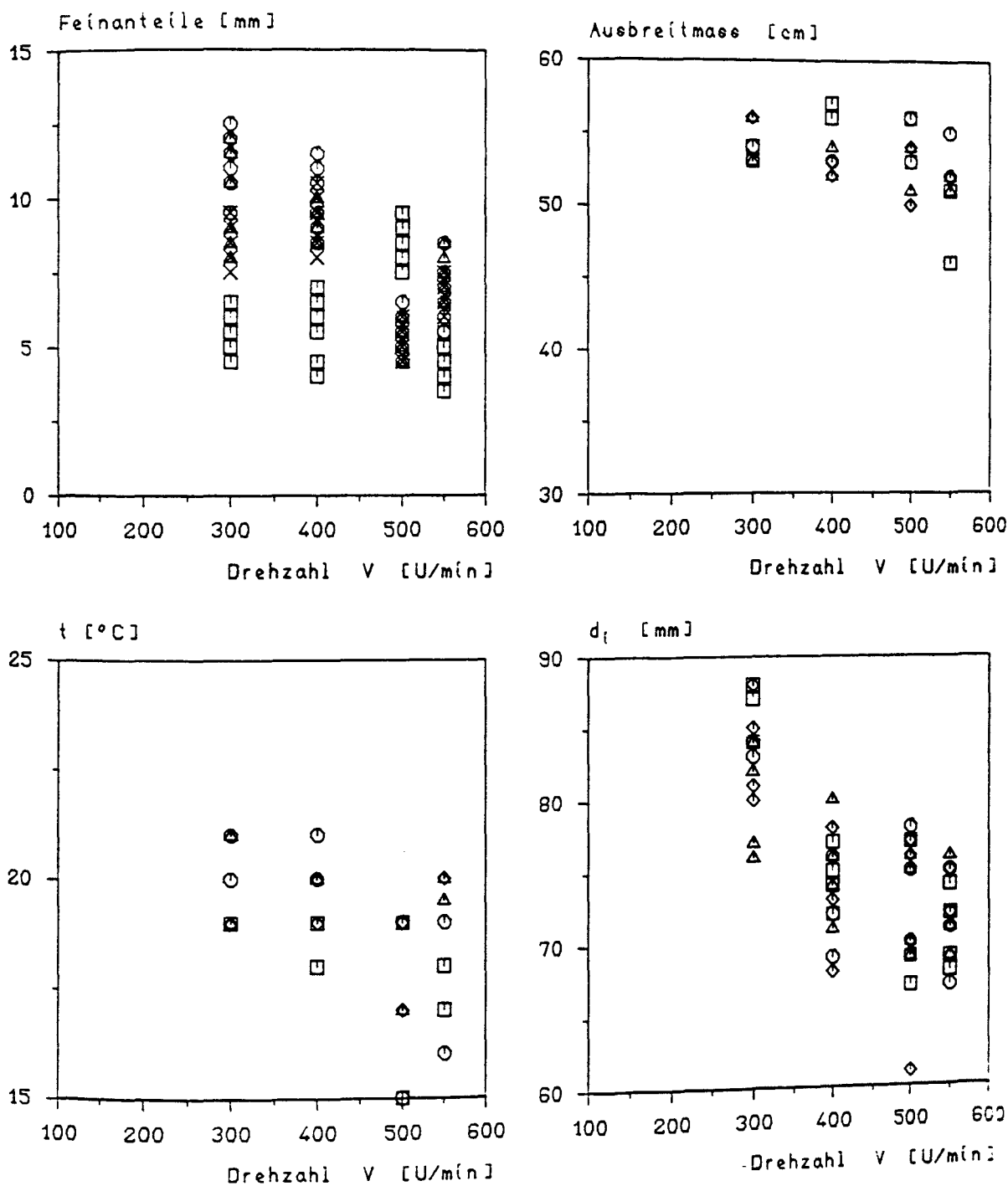


Bild 4: Schleuderbeton Hauptserie 2, w/z = 0,6

□ = t = 10 min
○ = t = 20 min

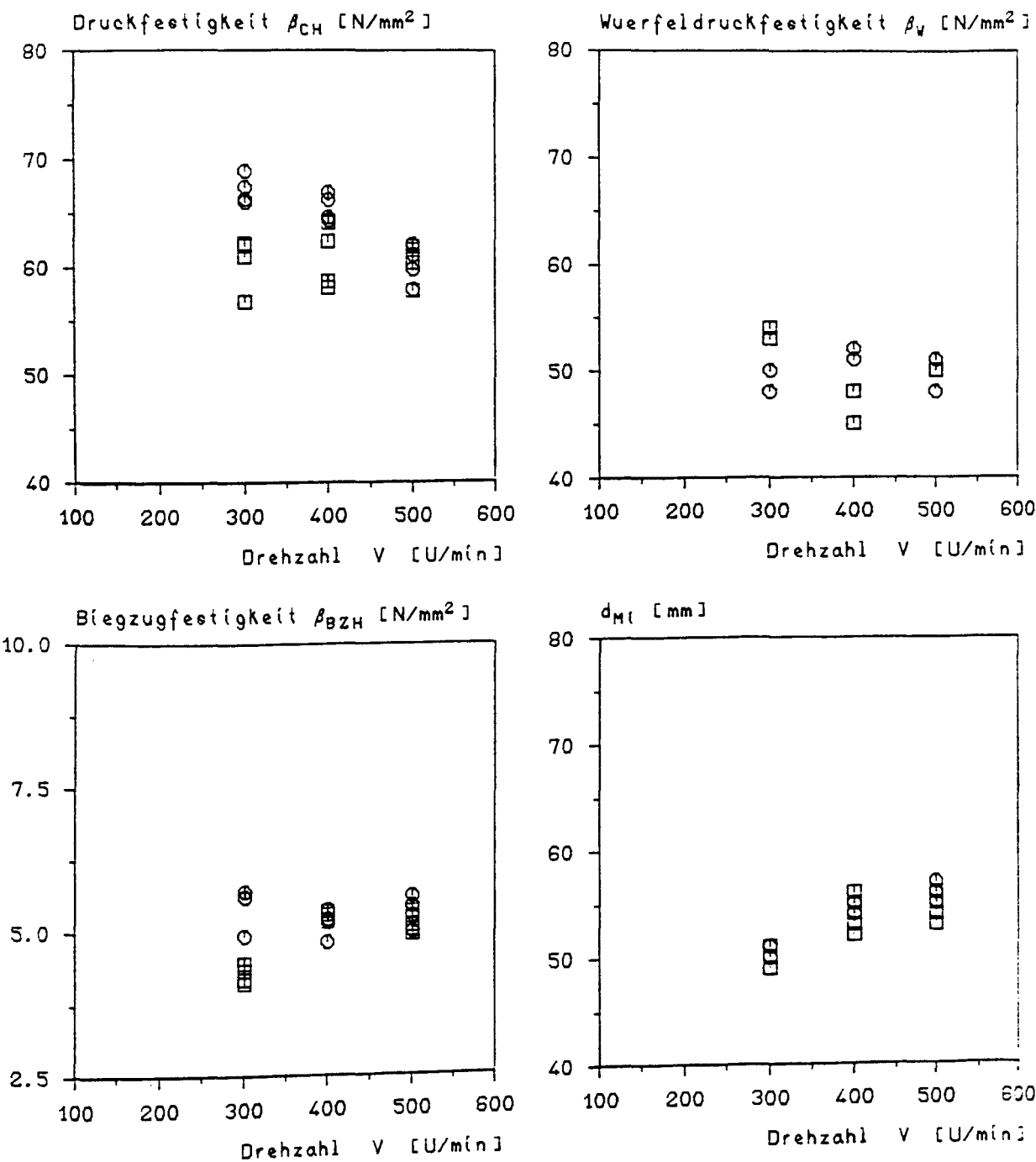


Bild 5: Schleuderbeton Serie A, w/z = 0,6

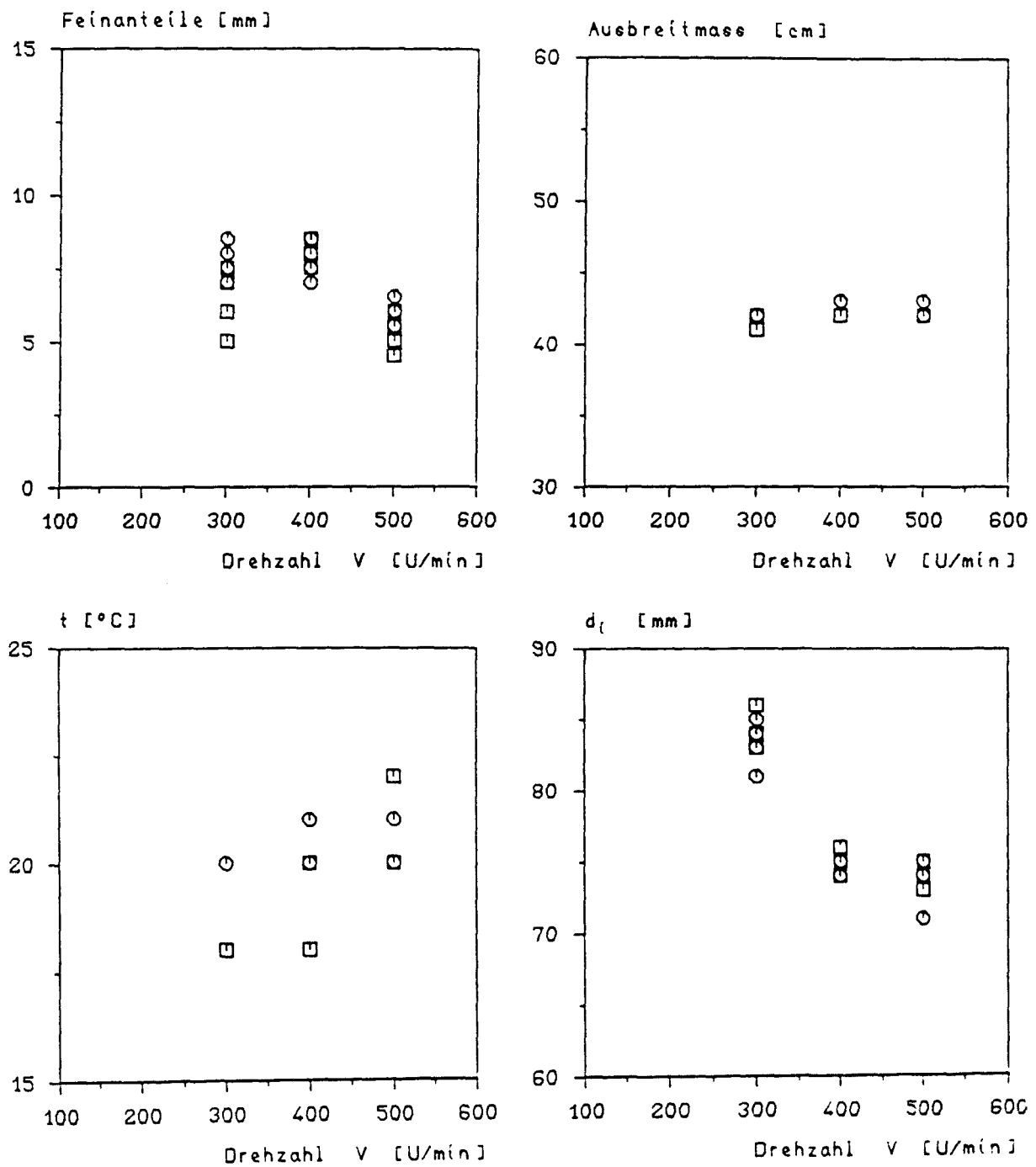


Bild 6: Schleuderbeton Serie A, w/z = 0,6

$\square = t = 10 \text{ min}$
 $\circ = t = 20 \text{ min}$

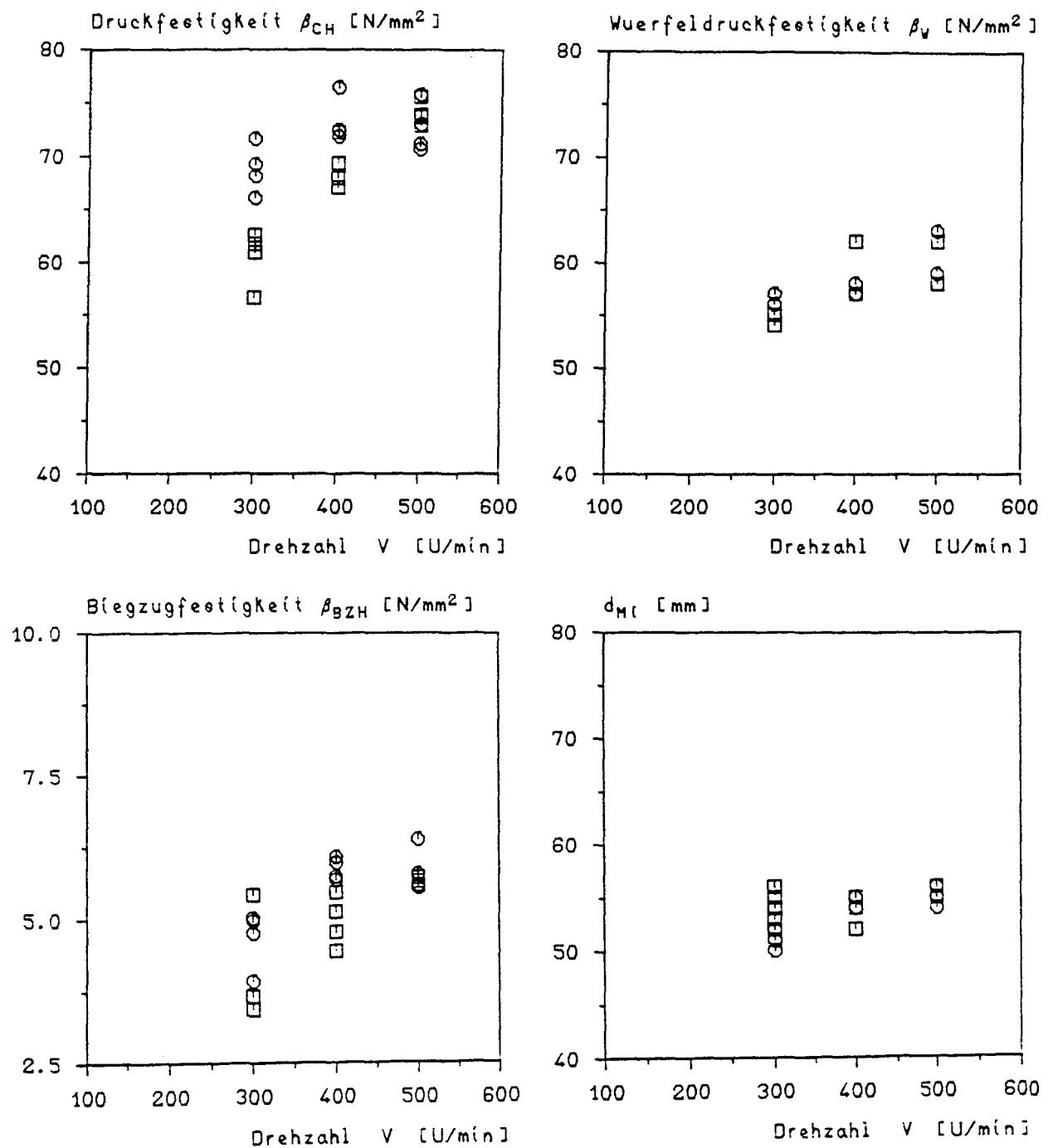


Bild 7: Schleuderbeton Serie B, w/z = 0,5

□ = t = 10 min
○ = t = 20 min

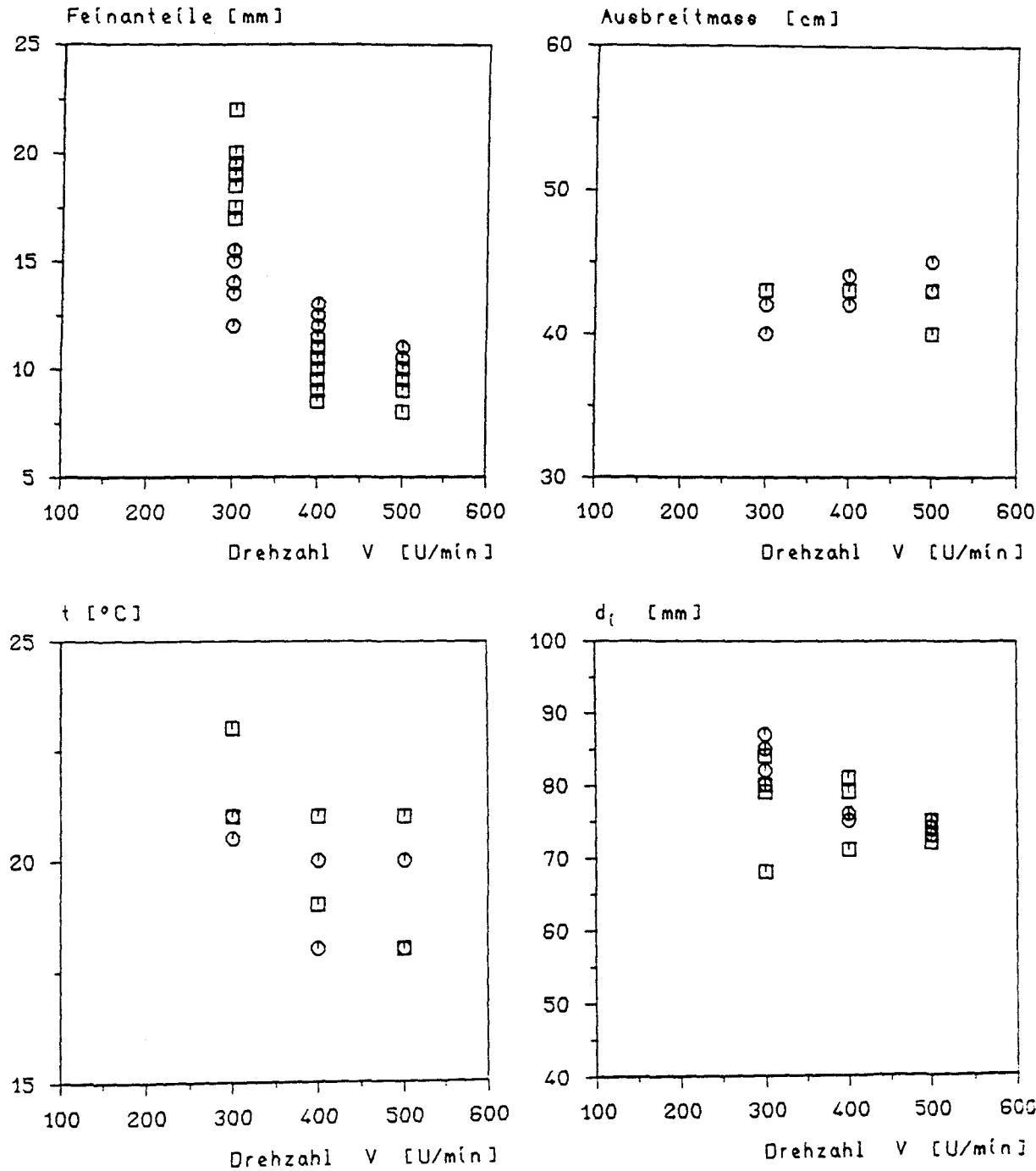


Bild 8: Schleuderbeton Serie B, w/z = 0,5

□ = t = 10 min
○ = t = 20 min

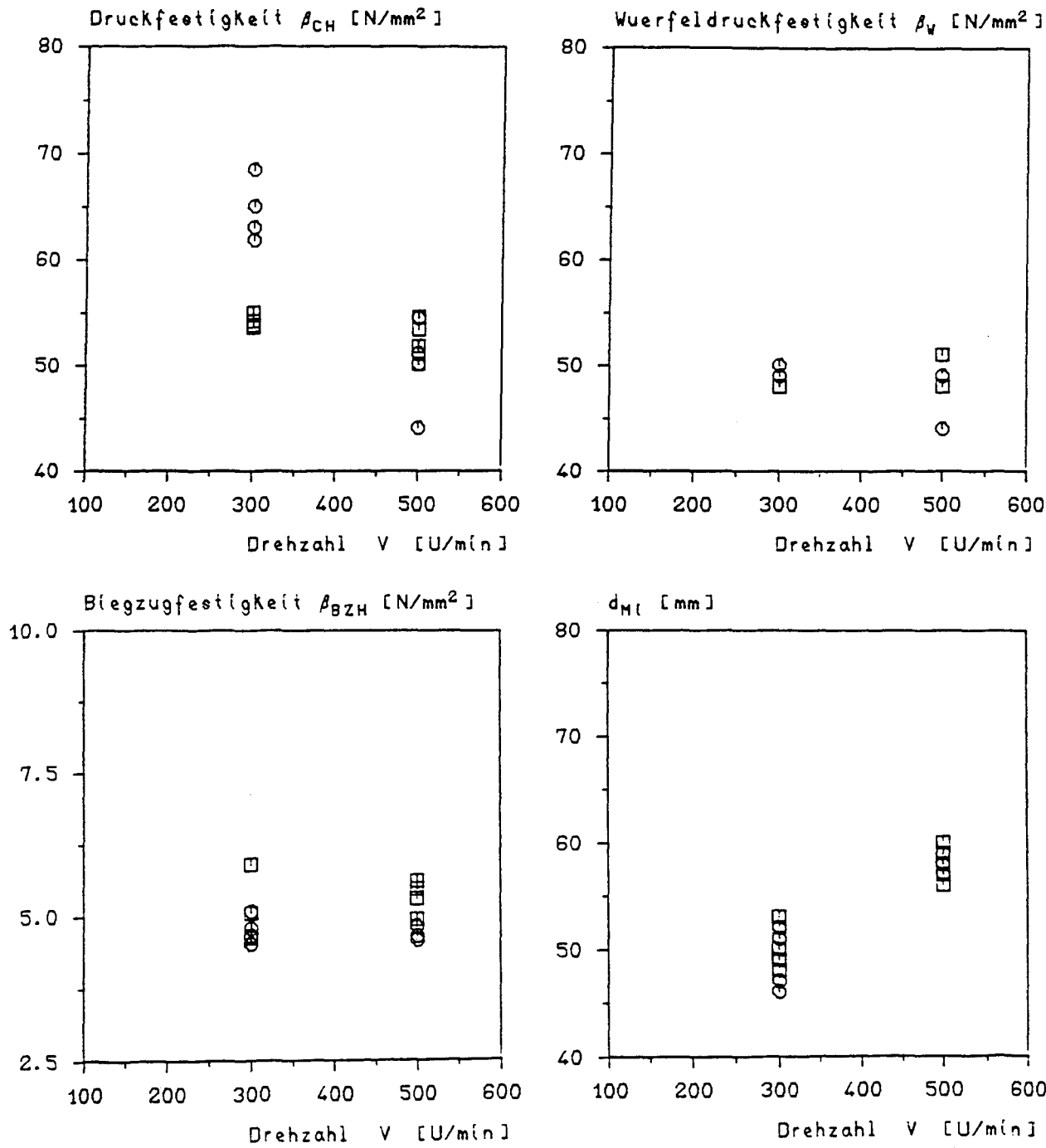


Bild 9: Schleuderbeton Serie B, w/z = 0,6

□ = t = 10 min
○ = t = 20 min

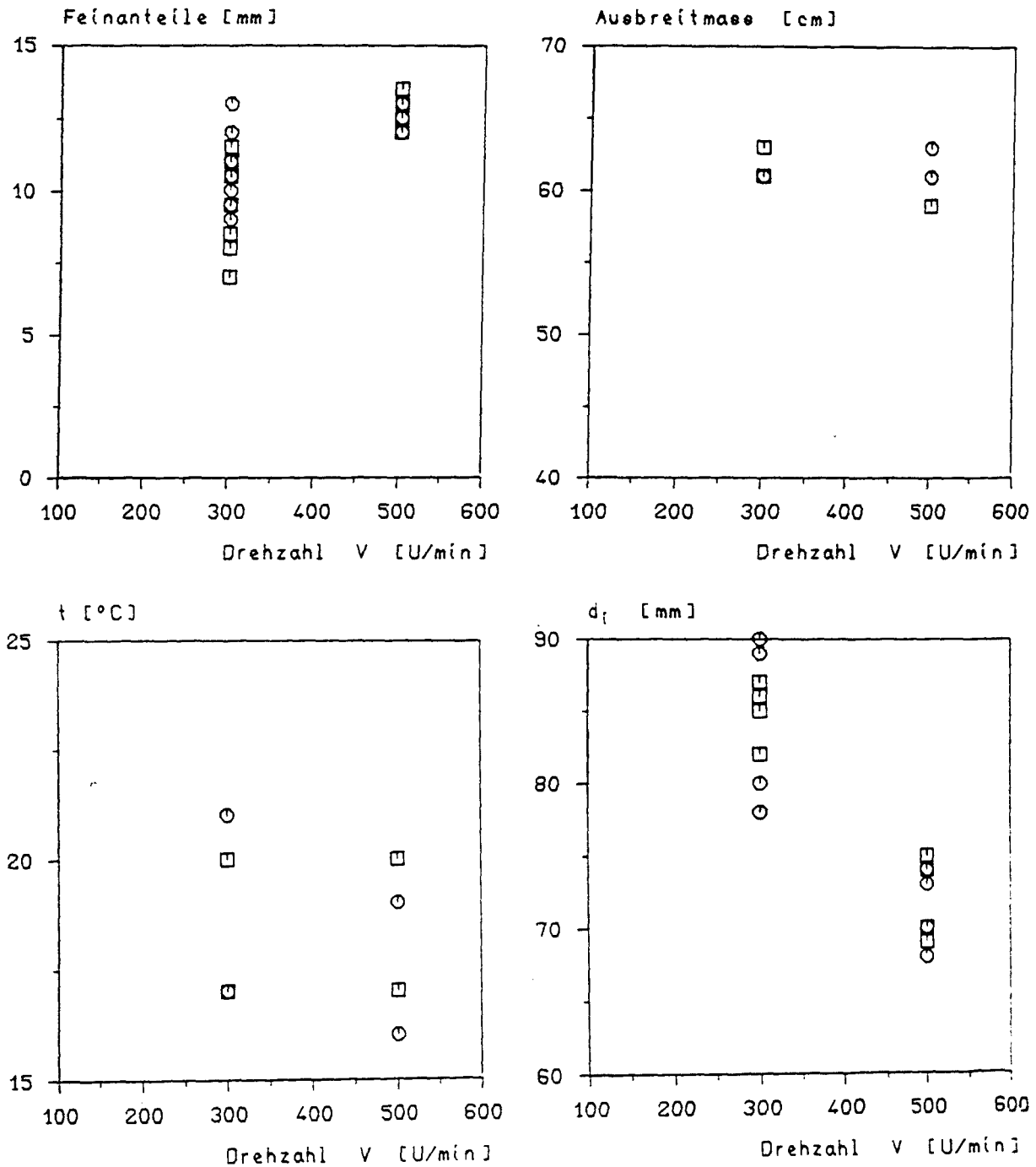


Bild 10: Schleuderbeton Serie B, w/z = 0,6

□ = t = 10 min
○ = t = 20 min

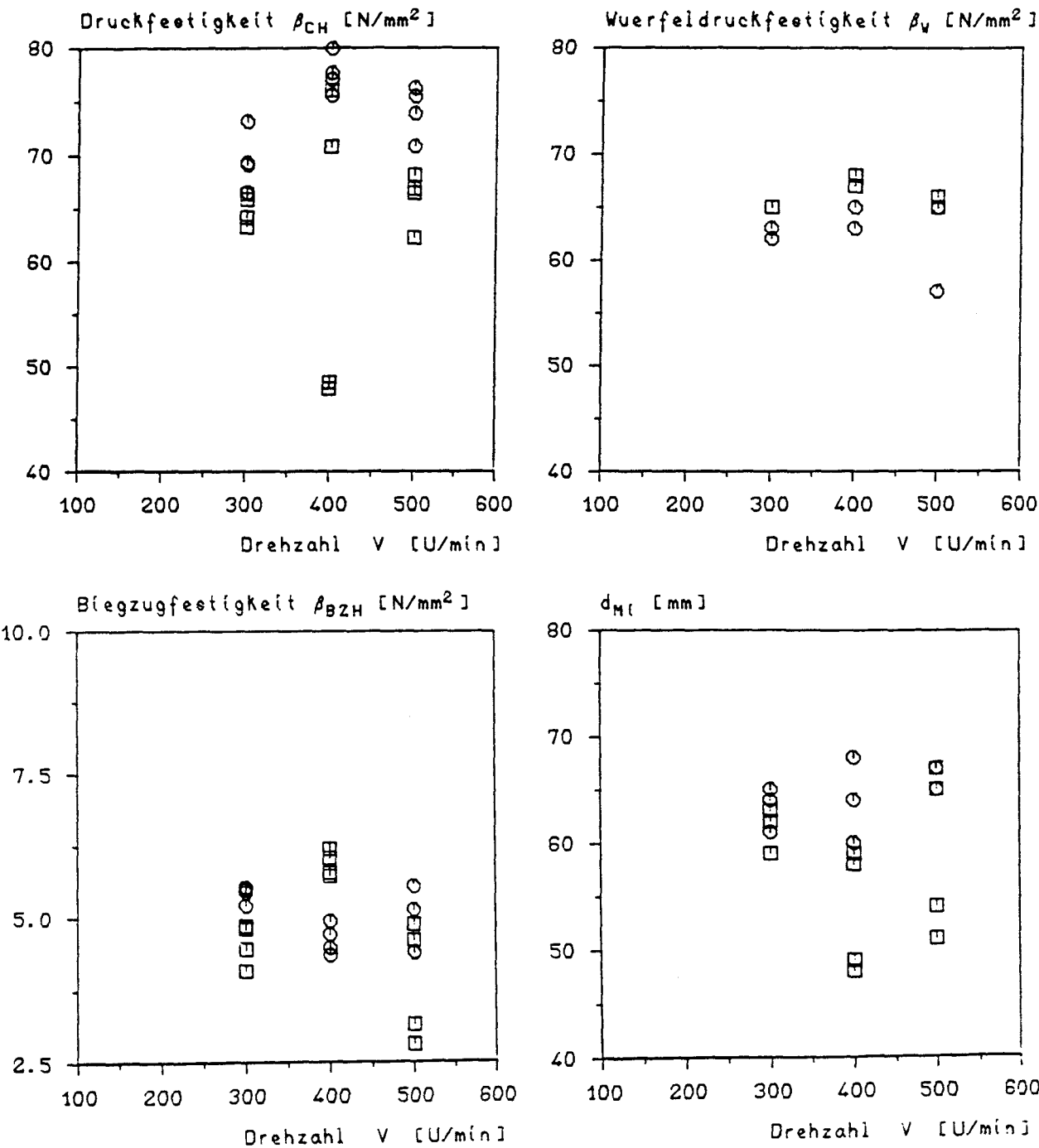


Bild 11: Schleuderbeton Serie C, w/z = 0,5

□ = t = 10 min
○ = t = 20 min

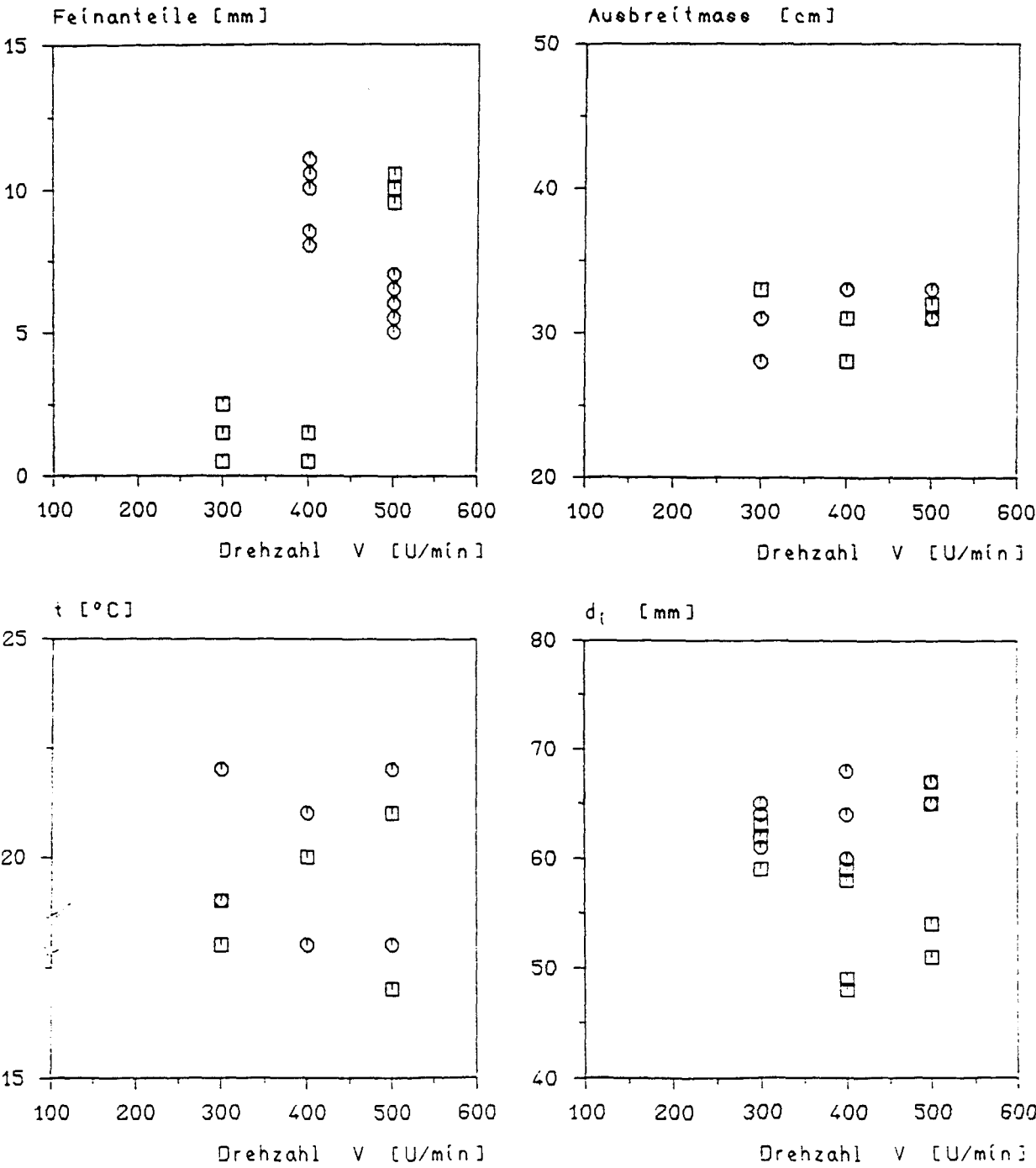


Bild 12: Schleuderbeton Serie C, w/z = 0,5

□ = t = 10 min
○ = t = 20 min

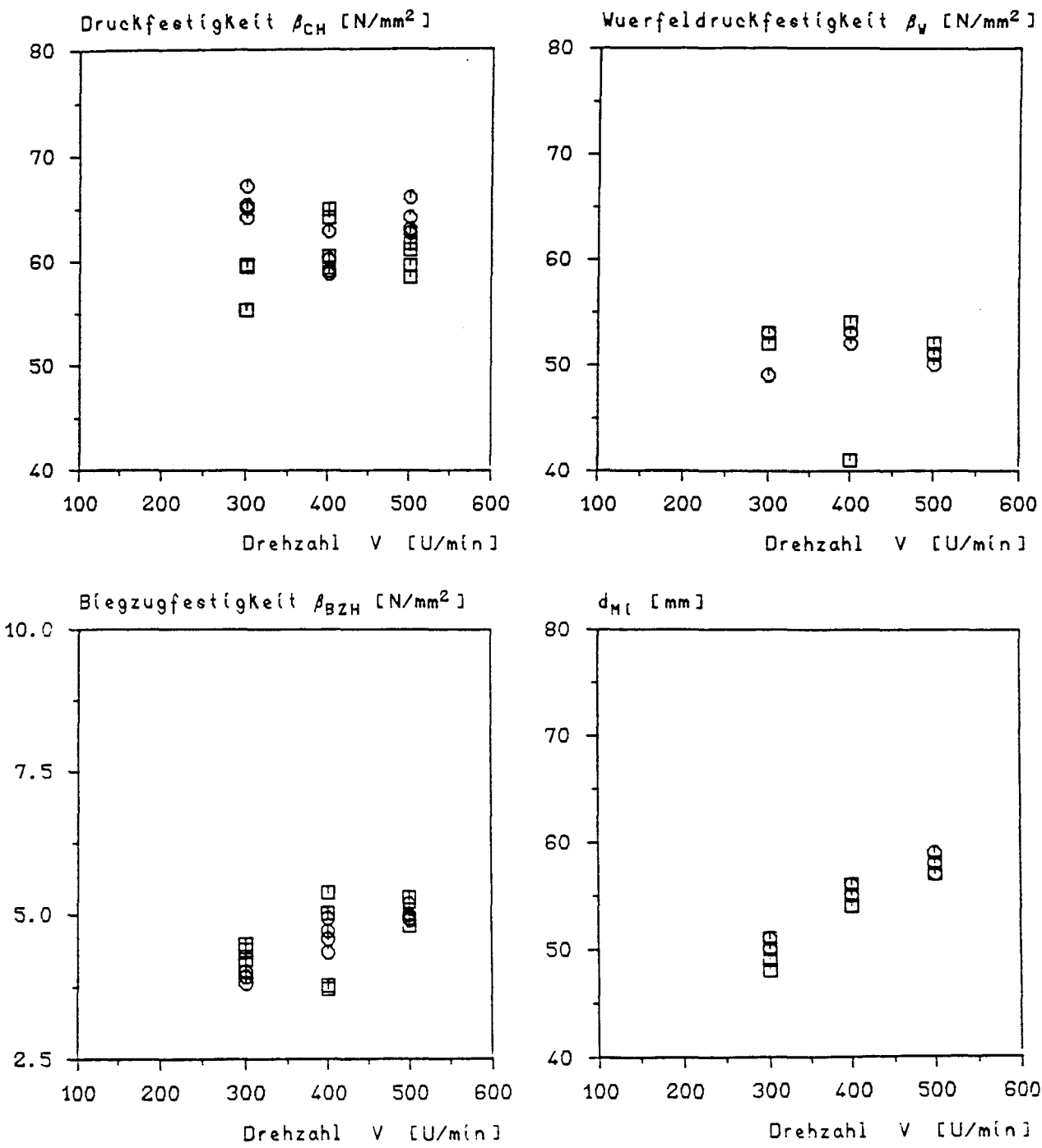


Bild 13: Schleuderbeton Serie C, w/z = 0,6

□ = t = 10 min
 ○ = t = 20 min

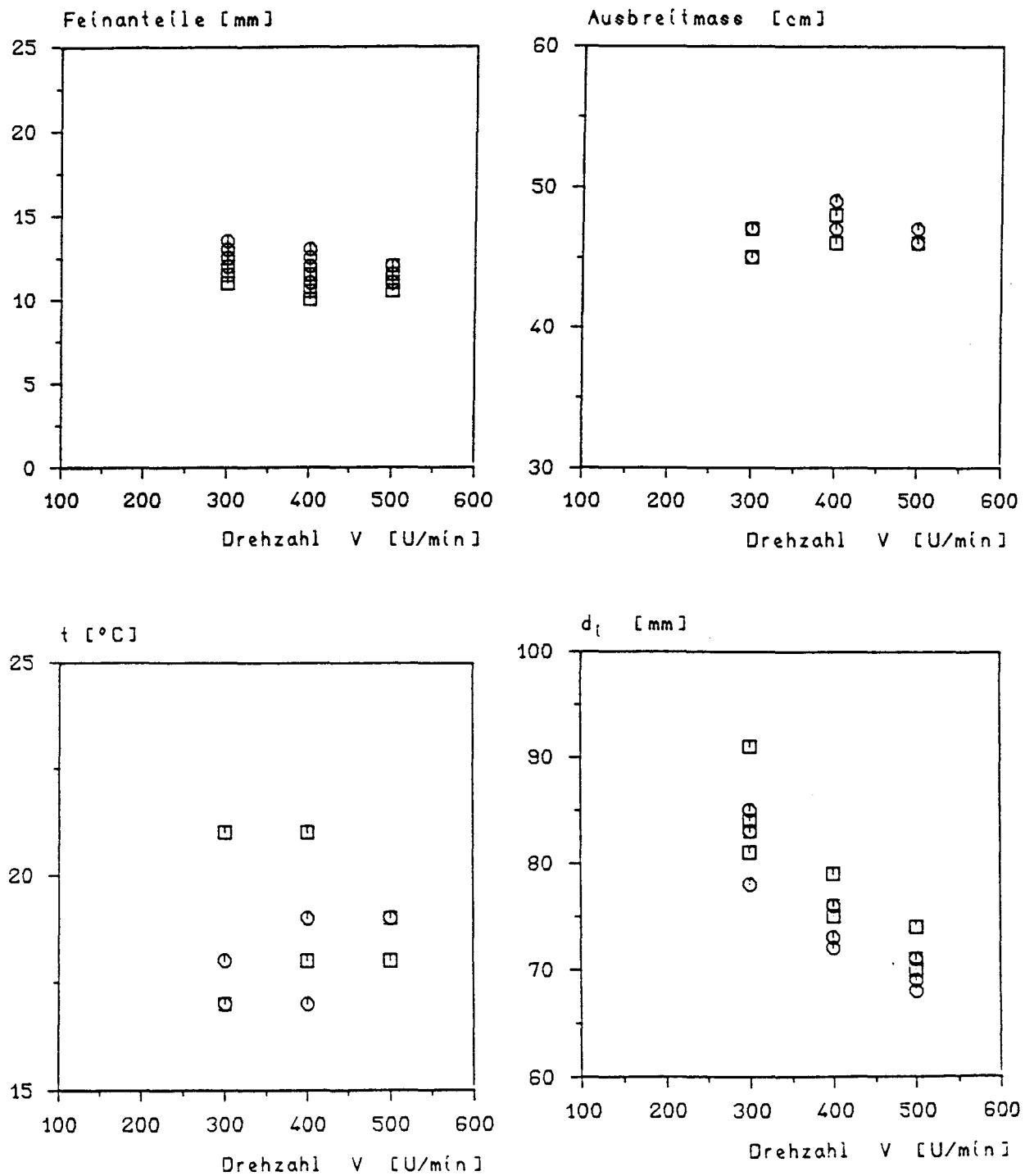


Bild 14: Schleuderbeton Serie C, w/z = 0,6

$\square = t = 10 \text{ min}$
 $\odot = t = 20 \text{ min}$

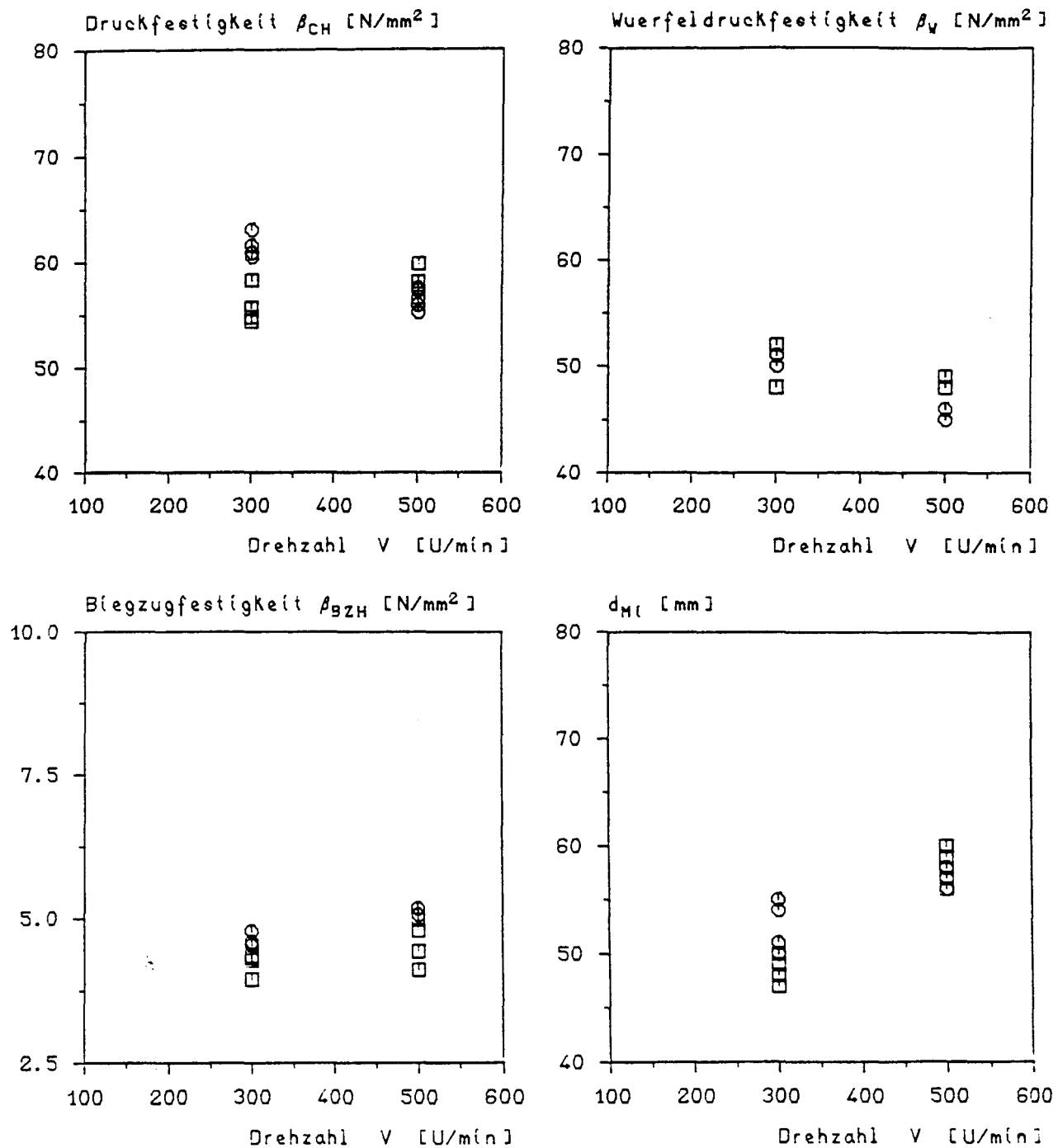


Bild 15: Schleuderbeton Serie D, w/z = 0,6

□ = t = 10 min
 ○ = t = 20 min

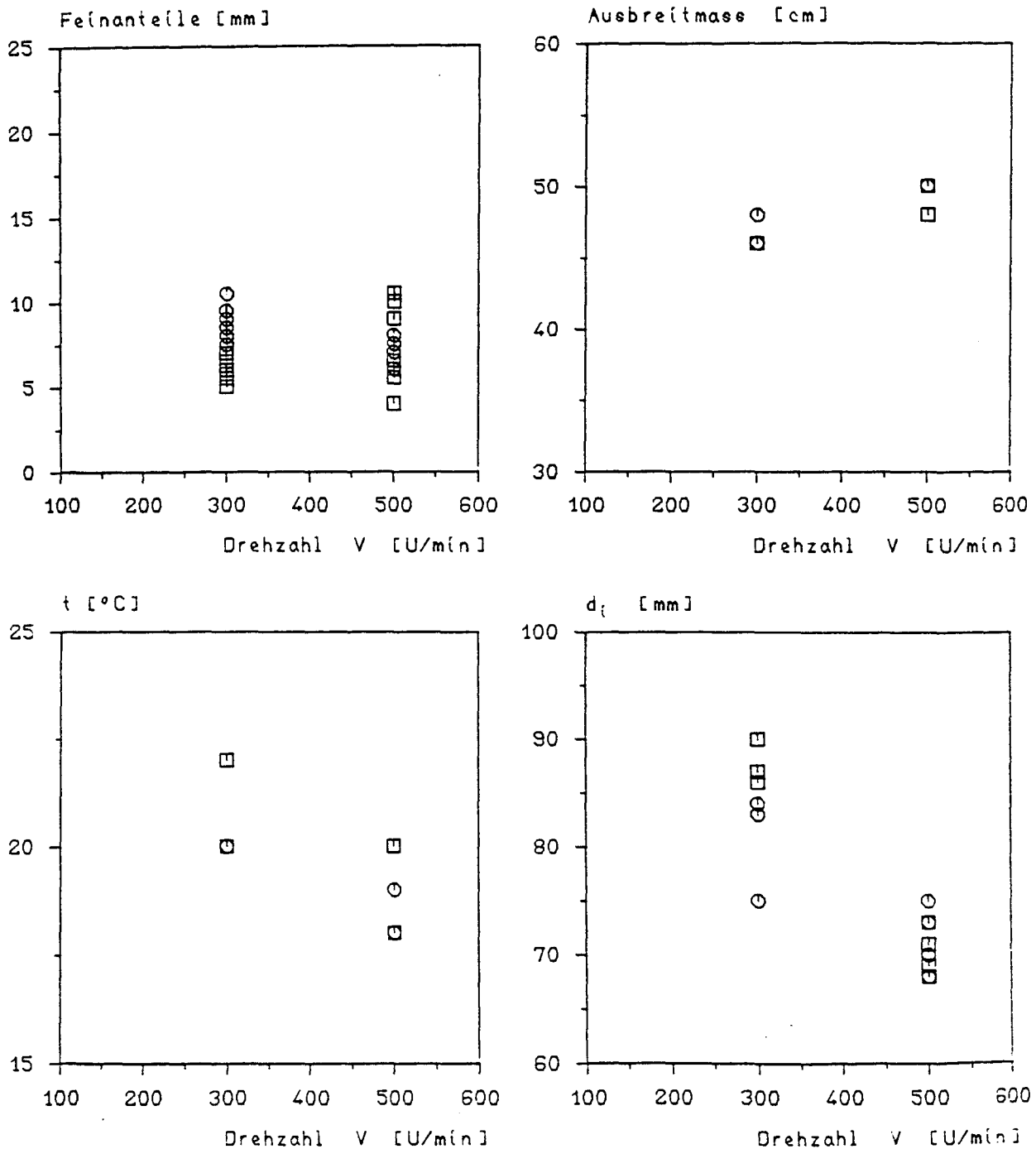


Bild 16: Schleuderbeton Serie D, w/z = 0,6

7095-04

01. OKTOBER 1990

30-0290/001